

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



KATEDRA TEXTILNÍ CHEMIE

Obor studia: 3106T 011 Textilní a oděvní technologie

Plazmatická předúprava kompozitních výztuží z vláken

Plasma treatment of fiber reinforced composites

Autor: Bc. Veronika Tlapáková

Vedoucí práce: Ing. Jana Šašková

Konzultant práce: Doc. Ing. Jakub Wiener Ph.D., Ing. Barbora Cigánová

Počet stran textu: 84

Počet obrázků: 100

Počet tabulek: 27

Počet grafů: 17

Počet stran příloh: 19

Zadání diplomové práce

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 17. května 2010

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat především vedoucí diplomové práce Ing. Janě Šaškové za odbornou pomoc a vedení při vypracování diplomové práce. Dále děkuji Doc. Ing. Jakubovi Wienerovi Ph.D. za cenné rady k danému tématu, Ing. Blance Tomkové Ph.D a Ing. Janě Grabmüllerové za pomoc při realizaci experimentů.

Anotace

Diplomová práce byla vypracována na téma plazmatická předúprava kompozitních výztuží z vláken.

Úkolem této práce byla aplikace plazmatické úpravy na čtyři různé typy tkanin (skelná, uhlíková, kevlarová a polyesterová) s odlišnými dobami působení plazmatu (20, 40 a 60 s). K opracování byl použit bariérový výboj (plazmový reaktor UPR100W). Pro srovnání byly použity i neupravené tkaniny. Nejdříve byla testována smáčivost polyesterovou pryskyřicí na neupravených a upravených vláknech a tkaninách. Tím byly získány hodnoty úhlů smáčení. Dále byly neupravené a upravené tkaniny spojeny polymerním pojivem za vzniku kompozitní struktury. Jako polymerní pojivo byla zvolena polyesterová pryskyřice a polyetylenová fólie. Na těchto kompozitních strukturách byla studována hloubka průniku pojiva do vláken a adhezní vlastnosti pojiva k vláknům.

Annotation

The theme of the Master's theses is plasma treatment of fiber reinforced composites.

The aim of this theses is application of plasma treatment on four different types of fabrics (glass, carbon, kevlar and polyester) with different interval of action of plasma (20, 40 and 60 s). A barrier discharge was used in the process (plasma reactor UPR100W). Even used fabrics were applied for comparison. Firstly wettability of modified or untreated fibers and fabrics was tested by the polyester resin. Thus the values of wetting angles were obtained. Furthermore, unadjusted and adjusted fabric were bonded by a polymeric binder to form the composite structures. As the polymer binder was selected polyester resins and polyethylene. On these composite structures the depth of penetration of binders into the fibers and adhesive properties of binders to fibers have been studied.

Klíčová slova

Plazma

Ionizovaný plyn

Kvazineutralita

Kolektivní chování

Kompozitní materiál

Vláknenná výztuž

Matrice

Fázové rozhraní

Adheze

Smáčení

Key words

Plasma

Ionised gas

Quasineutrality

Collective behaviour

Composite material

Fiber reinforcement

Matrix

Interface of phases

Adhesion

Wettability

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

obr.	obrázek
např.	například
atd.	a tak dále
tzv.	tak zvaný
apod.	a podobně
kap.	kapitola
$k [J.K^{-1}]$	Boltzmanova konstanta
$U_i [eV]$	ionizační energie
$T [K]$	teplota
$\epsilon_0 [F.m^{-1}]$	permitivita vakua
$e [C]$	elementární náboj elektronu
$n [kg.m^{-3}]$	hustota
$\omega_p [s^{-1}]$	plazmová frekvence
$\lambda [nm]$	vlnová délka
$\gamma [N.m^{-1}]$	povrchové napětí
$W_a [J]$	adhezní práce
$F_{max} [N]$	maximální dosažená síla
$W [J]$	práce
$A_{max} [mm]$	tažnost při maximální dosažené síle
PA	polyamid
PE	polyetylen
PET	polyetylentereftalát
PP	polypropylen
PTFE	polytetrafluoretylen
PES	polyester
LL	mezifáze kapalina - kapalina
LG	mezifáze kapalina - plyn
SS	mezifáze pevná látka- pevná látka
SL	mezifáze pevná látka - kapalina
SG	mezifáze pevná látka – plyn
PE-LD	polyetylenová fólie (nízkohustotní polyetylen)

OBSAH

OBSAH	- 8 -
1. ÚVOD	- 11 -
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	- 12 -
2.1 Plazma	- 12 -
2.1.1 Definice plazmatu	- 12 -
2.1.2 Výskyt plazmatu	- 12 -
2.1.3 Základní charakteristiky plazmatu.....	- 13 -
2.1.3.1 Stupeň ionizace	- 13 -
2.1.3.2 Teplota	- 14 -
2.1.3.3 Elektrický proud v plazmatu.....	- 14 -
2.1.3.4 Kvazineutralita	- 15 -
2.1.3.5 Debyeovo stínění	- 15 -
2.1.3.6 Kolektivní chování.....	- 16 -
2.1.3.7 Plazmová frekvence	- 17 -
2.1.4 Rozdělení plazmatu	- 18 -
2.1.5 Elementární procesy v plazmatu.....	- 20 -
2.1.5.1 Ionizace molekul.....	- 21 -
2.1.5.2 Disociace molekul.....	- 22 -
2.1.5.3 Rekombinace molekul	- 23 -
2.1.5.4 Vznik a zánik negativních iontů	- 23 -
2.1.5.5 Iont-molekulové reakce	- 23 -
2.1.6 Typy elektrických výbojů	- 24 -
2.1.6.1 Zdroje nízkoteplotního plazmatu	- 24 -
2.1.6.1.1 Nízkotlaké plazmové výboje	- 25 -
2.1.6.1.2 Výboje za atmosférického tlaku	- 26 -
2.1.7 Plazmatická úprava povrchů textilních materiálů.....	- 29 -
2.1.7.1 Základní procesy interakce plazmatu s vrchní vrstvou materiálu- 30 -	
2.1.7.1.1 Čistění povrchu materiálu	- 31 -
2.1.7.1.2 Moření vrchní vrstvy	- 31 -
2.1.7.1.3 Sítování molekul ve vrchní vrstvě	- 31 -
2.1.7.1.4 Vznik nových chemických struktur.....	- 32 -

2.1.7.1.5 Aktivace polymerů	32 -
2.1.7.1.6 Leptání povrchu.....	32 -
2.1.7.1.7 Povlakování	33 -
2.1.7.2 Vliv plazmatické úpravy v různých atmosférách.....	33 -
2.1.8 Vlastnosti a využití plazmatických úprav textilních materiálů.....	35 -
2.2 Kompozity	36 -
2.2.1 Historie kompozitů.....	36 -
2.2.2 Kompozitní materiály	37 -
2.2.2.1 Rozdělení kompozitních materiálů	37 -
2.2.3 Vláknové kompozity	39 -
2.2.3.1 Vláknenná výztuž	40 -
2.2.3.2 Matrice	41 -
2.2.3.3 Rozhraní mezi vlákny a maticí	41 -
2.2.4 Typy vláknenných produktů jako kompozitní výztuž	42 -
2.2.5 Vybrané výrobní metody vláknových kompozitů	44 -
2.2.5.1 Výrobní metody s otevřenou formou	44 -
2.2.5.2 Výrobní metody s uzavřenou formou	47 -
2.2.6 Unikátní vlastnosti vláknových kompozitů	49 -
2.2.7 Vliv plazmatu na vláknové kompozity	50 -
2.3 Povrchové napětí a povrchová energie, smáčení a adheze	51 -
2.3.1 Povrchové napětí a povrchová energie	51 -
2.3.2 Teorie smáčení.....	52 -
2.3.3 Teorie adheze.....	54 -
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	56 -
3.1 Charakteristika použitých materiálů	56 -
3.1.1 Vlastnosti použitých vláken.....	57 -
3.2 Charakteristika použitých polymerních pojiv a chemikálií.....	58 -
3.2.1 Použitá polymerní pojiva	58 -
3.2.1.1 Všeobecný popis použitých pojiv	60 -
3.2.2 Použitá chemikálie.....	61 -
3.3 Aplikace plazmatické úpravy a popis plazmového zařízení.....	61 -
3.4 Měření úhlu smáčení na vláknech a na tkaninách.....	62 -
3.5 Příprava kompozitních struktur pro zjišťování hloubky průniku pojiva do vláken	62 -

3.6 Měření adhezních vlastností pojiva k vláknům.....	65 -
3.7 Zjišťování chemických změn	66 -
4. VÝSLEDKY A DISKUSE.....	68 -
4.1 Naměřené úhly smáčení na vláknech a na tkaninách.....	68 -
4.2 Průnik pojiva do vláken	72 -
4.3 Naměřené výsledky na přístroji LabTest 2.010.....	75 -
4.4 Infračervená spektroskopie.....	77 -
5. ZÁVĚR	80 -
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	82 -
SEZNAM PŘÍLOH	85 -

1. ÚVOD

V posledních několika letech se plazma čím dál více využívá a má mnohem širší uplatnění. Patří mezi moderní zdroje energie, jejíž využití nacházíme v širokém spektru moderních technologií, jako jsou např. výbojky, plazmové televize nebo plazmové nástřiky pro tepelné štíty kosmických lodí. Dále se plazma používá v lékařství na odstranění (rozbití) ledvinových kamenů nebo v moderních spalovnách odpadů pro ekologický rozklad škodlivých látek.

V textilním průmyslu má plazmatická úprava vliv na zlepšení smáčivosti povrchů textilie, zlepšení adhezních vlastností a chemické stability, zlepšení barvitelnosti, zvýšení ostroty tisku, lepší odolnosti při praní a nošení textilií. Výhodou plazmatu je to, že může upravovat vrstvy o hloubce v řádech desítek nanometrů. Dokáže textilu udělit požadované vlastnosti, aniž by se změnila vlastnosti polymeru uvnitř vláken. Jedná se tedy o povrchovou úpravu. Povrchové úpravy plazmatem nevyžadují použití toxických chemikálií a nevznikají při nich žádné chemické odpady.

Polymerní vláknové kompozity mají široké využití v mnoha průmyslových oblastech (automobilová, námořní a letecká doprava, stavebnictví, elektrotechnický a spotřební průmysl). Jejich užité vlastnosti závisí na materiálových vlastnostech vyztužujících vláken, polymerních matricích, ale také na tenkých hraničních vrstvách (mezivrstvách) na rozhraní mezi vyztužujícím vláknem a polymerní matricí. Vlákná jsou účelově povrchově upravována nanášením tenkých vrstev s cílem zlepšit smáčivost jejich povrchu a adhezi vláken k matrici, a tím zajistit zvýšení užitečných vlastností kompozitu (pevnost, houževnatost). Komerční povrchové úpravy vláken mají svá omezení a vzrůstá snaha najít nové postupy a nové technologie povrchových úprav, které by zajistily vyšší užité vlastnosti kompozitních materiálů využitých ve standardních, ale také náročnějších (vlhkých, korozivních) prostředích. Vedle zdokonalování přípravy mezivrstev z vodných roztoků se rozvíjejí technologie chemického roubování, ale také technologie plazmochemické – plazmová polymerace.

[33]

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Plazma

2.1.1 Definice plazmatu

Plazma je kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. Ve fyzice a v chemii se plazma považuje za ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů, (a případně neutrálních atomů a molekul), který vzniká odtržením elektronů z elektronového obalu atomů plynu, či roztržením molekul (ionizací). Převážně je plazma označováno jako čtvrté skupenství hmoty. V exaktní definici plazmatu jsou na ionizovaný plyn kladeny jisté doplňující požadavky. Aby byl ionizovaný plyn považován za plazma, musí vykazovat kolektivní chování a kvazineutralitu. [1] Kolektivní chování jsou pohyby, které nezávisí pouze na lokálních podmínkách, ale také na stavu plazmatu ve vzdálených oblastech. Kladně a záporně nabitě částice se pohybují podle svého náboje – chovají se kolektivně. [2] Kvazineutralita znamená, že množství volného záporného náboje je přibližně stejné jako množství kladného náboje. [1]

2.1.2 Výskyt plazmatu




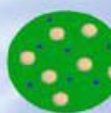
Často se říká, že plazma je nejrozšířenější forma látky, která tvoří až 99% pozorované hmoty vesmíru. [2] Plazma existuje ve vesmíru v různých, často velmi odlišných formách. S plazmatem se můžeme setkat například ve formě blesku, polární záře, slunečního větru (obr. 1, 2, 3), uvnitř zářivek a tzv. neonů. Plazma tvoří také konvenční hvězdy, ionosféru, oheň či mlhoviny. [1] Žijeme tedy v jednom procentu vesmíru, kde se plazma nevyskytuje přirozeně. [2]



Obrázek 1, 2, 3.: Blesk, polární záře a sluneční vítr

Do plazmatu většinou nezahrnujeme různé svazky nabitých částic (nesplňují kvazineutralitu) a velmi slabě ionizované plyny - např. plamen svíčky (nesplňují kolektivní chování). [3]

Přirozený výskyt plazmatu je při vysokých teplotách a to je důvodem označení jako “čtvrté skupenství hmoty” [2]. Silným ohříváním ostatních skupenství přes pevné, kapalné a plynné je nakonec dosaženo plazmatu dle obr. 4. Díky vysoké teplotě se velká část atomu rozpadne¹ na záporně a kladně nabitě ionty a vzniká ionizovaný plyn.

Pevná látka	Kapalina	Plyn	Plazma
Příklad	Příklad	Příklad	Příklad
Led H_2O	Voda H_2O	Pára H_2O	Ionizovaný plyn $H^+ + H^+ + 2e^-$
Studený $T < 0\text{ °C}$	Teplá $0\text{ °C} < T < 100\text{ °C}$	Horký $T > 100\text{ °C}$	$T > 10\,000\text{ °C}$
			
Molekuly jsou fixovány v mřížce	Molekuly se mohou volně pohybovat	Molekuly se mohou volně pohybovat, větší vzdálenosti	Ionty a elektrony se mohou nezávisle pohybovat, větší vzdálenosti

Obrázek 4: Změna skupenství vody s rostoucí teplotou [2]

2.1.3 Základní charakteristiky plazmatu

2.1.3.1 Stupeň ionizace

Stupeň ionizace plazmatu (poměr počtu ionizovaných částic vůči celkovému počtu částic) je jedním z nejdůležitějších parametrů, který určuje chování plazmatu. Závisí především na teplotě a lze ho v prvním přiblížení odhadnout ze Sahovy rovnice pro jedenkrát ionizované plazma v termodynamické rovnováze. [1] [4]

Sahova rovnice

Vlivem vzrůstající teploty v plazmatu, roste kinetická energie částic, tím i četnost jejich srážek a tedy i stupeň ionizace. To popisuje Sahova rovnice, která má následující tvar:

$$\frac{P_+^2}{1 - P_+} = CT^{3/2} \exp\left(-\frac{U_i}{kT}\right) \quad (1)$$

¹ Naruší se atomární vazby

kde: $C \sim 2,4 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$

P_+ - stupeň ionizace

U_i - ionizační potenciál

T - teplota plazmatu

k – Boltzmannova konstanta²

Tato rovnice je použitelná pro plyny. Někdy se za jistý druh plazmatu považují i pevné látky (např. kovy), které mají volné nosiče nábojů a vykazují kolektivní chování. Zde však počet volných nosičů náboje není určen Sahovou rovnicí. [1]

2.1.3.2 Teplota

Teplota je důsledkem pohybu částic. Na teplotu plazmatu je však třeba nahlížet trochu jinak, než jak je běžné. Vysoká teplota totiž nijak nesouvisí s vysokou tepelnou energií systému. [5] Teplota elektronu je značně vyšší než teplota iontu a plynu, to jest:

$$kT_e \gg kT_i \approx kT_g \quad (2)$$

kde: T_e - teplota elektronu

T_i - teplota iontu

T_g - teplota plynu

V nízkotlakém ($\ll 100 \text{ Pa}$) plazmatu teploty plynu a iontu mohou být 300 K, zatímco teploty elektronu mohou dosáhnout přes 20 000 K. V literatuře teplota a další energie jsou často uvedené v jednotkách elektronvoltů (eV), kde $kT = 1 \text{ eV}$, kterému odpovídá teplota $T = 11\,600 \text{ K}$. [6] Teplota je tedy obvykle měřena ve stupních Kelvinových nebo v elektronvoltech. Z výše uvedených Sahovy rovnice vyplývá, že teplota má vliv na míru ionizace a tak se zvyšující se teplotou plazmatu roste stupeň ionizace.

2.1.3.3 Elektrický proud v plazmatu

Plazma obsahuje volný elektrický náboj, proto je elektricky vodivé. Díky elektrické vodivosti působí na plazma i silné magnetické pole. S rostoucí koncentrací nabitých částic se mění i koeficienty tepelné vodivosti a dynamické viskozity plynu.

Elektromagnetická síla a dobrá elektrická vodivost plazmatu (která může být v mnoha případech považována za nekonečnou) obvykle zajistí, že hustota kladných a

² $k = (1,380658 \pm 0,000012) \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ [1]

záporných nábojů se vyrovná ("kvazineutralita"). Je-li v plazmatu významný nadbytek kladných nebo záporných nábojů, hraje elektrické pole v plazmatu dominantní roli (v extrémním případě může obsahovat jen z kladné nebo jen záporné náboje). [1]

2.1.3.4 Kvazineutralita

Často se uvádí, že plazma obsahuje stejné množství kladně nabitých iontů a záporně nabitých iontů tzn., že součet veškerého náboje je nulový. [6] Navenek se tedy plazma jeví jako elektricky neutrální, ale z mikroskopického hlediska volné elektrony a ionty způsobují svými elektromagnetickými interakcemi všechny charakteristické jevy v jeho chování. [5] Ve skutečnosti plazma neobsahuje přesně stejné množství elektronů a iontů, ale počet nábojů je obrovský, rozdíl je relativně malý a tak se užívá pojem kvazineutralita tedy $n_e = n_i$ je velmi dobrá aproximace. [6]

2.1.3.5 Debyeovo stínění

Debyeovo stínění úzce souvisí s kvazineutralitou. Tento jev je pozorován např. v přítomnosti pevné látky v plazmatu. Pevná látka nese náboj, ale ten je díky kvazineutralitě plazmatu odstíněn. Ve vzdálenosti označované jako Debyeova stínící délka je již plazma opět kvazineutrální. [1] Tento efekt lze pozorovat jen v případě, že rozměry plazmatu musí být mnohem větší (alespoň o řád) než Debyeova délka. Jen tak mohou být všechny vnější potenciály odstíněny na mnohem menších vzdálenostech, než jsou rozměry plazmatu a může být zachována kvazineutralita. Kromě toho musí mít Debyeovo stínění statistický charakter, tedy počet nabitých částic musí být dostatečně velký. Jeden nebo několik párů elektron-iontů nelze považovat za plazma. [5]

Debyeova stínící délka

Předpokládejme homogenní plazma. Do plazmatu vložíme nepohyblivý náboj q . Částice se souhlasným nábojem jsou jím odpuzované a s nesouhlasným přitahované. Plazma se proto polarizuje a elektrické pole vloženého náboje tím pádem odstíní. Odstíněním klesne potenciál elektrického pole v plazmatu oproti potenciálu elektrického pole ve vakuu na $1/e$ ve vzdálenosti zvané Debyeova stínící délka, dle obrázku 5. [1] Debyeova stínící délka se vypočítá z rovnice:

$$h = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k}{e^2 n_0} \cdot \frac{T_+ T_-}{T_+ + T_-}} \quad (3)$$

kde: h - Debyeova stínící délka

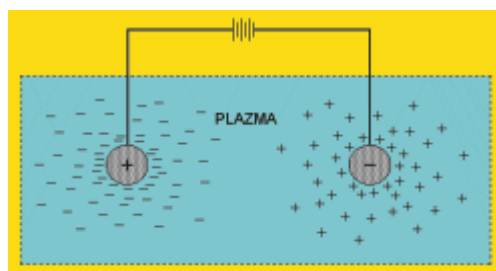
T_+ a T_- - teploty kladných iontů a elektronů

$n_0 = n_+ = n_-$ - koncentrace nabitých částic

ϵ_0 - permitivita vakua

e - elementární náboj elektronu³

k - Boltzmannova konstanta



Obrázek 5: Stínící vrstva kolem nábojů vložených do plazmat [5]

2.1.3.6 Kolektivní chování

Kolektivním chováním se rozumí, že plazma je schopné jako celek svými projevy generovat globální elektrická a magnetická pole a na taková globální pole reagovat. [4]

V ionizovaném plynu se nabitě částice mohou vzájemně ovlivňovat i na dálku. Elektrická pole, která byla vytvořena nabitými částicemi, silově působí na ostatní nabitě částice až do vzdálenosti Debyeovy stínící délky. Na delších vzdálenostech je pole dostatečně odstíněno, tak už neuvažujeme jeho působení. Kladně a záporně nabitě částice se pohybují podle svého náboje, tzn., že se chovají kolektivně tak, aby eliminovaly vliv externě přivedených nábojů. Důležitou charakteristikou plazmatu je počet částic (iontů nebo elektronů) stejného znaménka v jednotce objemu, nazýváme ji koncentrace plazmatu a značíme n_0 (koncentrace plazmatu vystupuje v rovnici 3 pro Debyeovu stínící délku). O počtu neutrálních atomů veličina n nic neříká. Neutrálních částic může být v plazmatu více než nabitých, nebo méně než nabitých, dokonce tam nemusí být ani jedna neutrální částice. [8]

³ $e = 1,602\ 189\ 2 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$ [1]

2.1.3.7 Plazmová frekvence

Plazmová frekvence je charakteristická frekvence oscilací a vln v plazmatu, která souvisí s pohyby elektronů na pozadí iontů. Vratnou silou je Coulombova elektrická síla vznikající vychýlením souboru elektronů oproti souboru iontů. [35]

Plazmová frekvence ω_p ve studeném plazmatu je dána vztahem:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (4)$$

kde: ω_p - plazmová frekvence

n_e - koncentraci elektronů v m^{-3}

e - náboj elektronu

ϵ_0 - permitivita vakua

m_e - hmotnost elektronu

Z rovnice 4 vidíme, že frekvence závisí především na koncentraci elektronů. Čím větší koncentrace elektronů, tím vyšší plazmová frekvence, protože tím větší bude působit síla mezi elektrony a kladně nabitými ionty. Dále vidíme, že kdyby měly elektrony větší náboj, plazmová frekvence by se také zvětšila, protože by opět vzrostla síla, která k sobě opačné náboje přitahuje. A kdyby byly elektrony těžší, déle by brzdily, pak by hodnota plazmové frekvence byla nižší. [8]

Tři základní podmínky, které musí ionizovaný plyn splňovat, aby byl považován za plazma:

$$\lambda_D \ll L, N_D \gg 1, \omega\tau > 1 \quad (5)$$

kde: λ_D - Debyeova délka

N_D - počet částic v Debyeově sféře

L - charakteristický rozměr plazmatu

ω - frekvence plazmových oscilací

τ - střední doba mezi srážkami s neutrálními atomy

I. podmínka: Jestli Debyeovo stínění má být efektivní, pak velikost systému musí být řádově větší než je Debyeova délka. [6]

II. podmínka: Počet nabitých částic v objemu o velikosti Debyeovy sféry musí být výrazně větší než jedna. Aby vůbec mohl být vzniklý náboj odstíněn, je potřeba dostatek částic. Máme-li ionizovaný plyn příliš řídký, v okolí lokálního náboje není dostatek částic na jeho odstínění. [8]

III. podmínka: Nabité částice se mohou srazit s neutrálními částicemi pouze zřídka v porovnání s periodou své plazmové frekvence. [8]

Jsou-li splněny tyto podmínky, tak je plazma kvazineutrálním ionizovaným plynem. [8]

2.1.4 Rozdělení plazmatu

Plazma lze rozdělit z hlediska fyzikálních procesů do několika kritérií, podle:

➤ **Stupně ionizace**

Podle stupně ionizace rozlišujeme:

1) slabě ionizované plazma – v tomto typu plazmatu je relativně větší přítomnost koncentrace neutrálních částic oproti koncentraci nabitých částic. [10] Nabité částice se tedy převážně srážejí s molekulami plynu. [2]

2) silně ionizované plazma – je plazma, ve které koncentrace nabitých částic převládá (neutrální molekuly plynu mají zanedbatelnou koncentraci). Zde dominují vzájemné srážky nabitých částic. [2]

➤ **Teploty**

Podle teploty plynu rozlišujeme dva druhy plazmatu:

1) vysokoteplotní plazma – je plazma, kde teplota plynu je vyšší než 10^6 K. Vyskytuje se zejména ve vesmíru, zahrnuje všechny hvězdy nebo vzniká při jaderném výbuchu. Obsahuje zcela ionizované molekuly a už v ní téměř neexistují neutrální atomy. [9]

2) nízkoteplotní plazma – to je plazma s teplotou plazmového plynu nižší než 10^6 K, která se vyskytuje převážně na Zemi např. v zářivkách a výbojkách, také v elektrickém oblouku, který se používá na sváření kovových materiálů. [9]

Nízkoteplotní plazma se dále dělí na:

a) horké plazma – s teplotou plazmového plynu řádově 10^4 K. Připravuje se za vysokých tlaků (více než 10 kPa) s využitím stejnosměrného i střídavého proudu, radiových frekvencí nebo mikrovlnného záření. Toto plazma má vysoké teploty. Energie elektronů a iontů je kolem 1-2 eV. Typická je nízká ionizace plazmového plynu. Teplota plazmového plynu je blízká teplotě elektronů, a proto bývá označována jako teplotně vyvážené plazma. Tento typ plazmatu se používá k likvidaci pevných, kapalných i plyných toxických a nebezpečných látek nebo v případě plazmového naprašování k tvorbě povrchových nánosů na kovech a anorganických materiálech. [7]

b) studené plazma – s teplotou plazmového plynu řádově 10^2 K. Připravuje se za nízkého tlaku (ve vakuu) a aplikací elektromagnetické energie (mikrovln). Nízkoteplotní plazma může být také generovaná při atmosférickém tlaku (korónové výboje). Korónové výboje jsou hlavně používané pro zlepšení smáčivosti povrchů. Studené plazma má také podíl ionizovaných částic malý - asi jedno procento. Teplota plazmového plynu nízká (blízká okolní teplotě), kolem 303-373 K (přibližně stejná jako teplota iontů), proto lze toto plazma použít pro všechny organické materiály. Teplota elektronů odpovídá teplotám několik tisíc stupňů v rozmezí 10 000 - 50 000 K. Studené plazma se dá použít pro různé druhy povrchové modifikace od jednoduchých topografických změn až k povrchovému roubování, kdy je chemické složení a vlastnosti povrchu zcela jiné než složení jádra. [7]

➤ **Termodynamické rovnováhy**

Z tohoto hlediska dělíme plazma na:

- 1) **rovnovážné plazma (izotermní)** – jedná se o plazma, které je v úplné termodynamické rovnováze, tj. všechny částice v plazmatu mají stejnou teplotu i energii. Takové plazma se vyskytuje ve hvězdách. [11]
- 2) **nerovnovážné plazma (neizotermní)** – zde se teploty jednotlivých druhů částic mohou navzájem lišit. [11] Typicky mají rychlé elektrony vysokou teplotu a pomalé těžké ionty nízkou teplotu. [12]

➤ **Tlaku**

Dle tlaku dělíme plazma na:

- 1) **nízkotlaké plazma** – s malou hustotou částic a nízkou srážkovou frekvencí a tedy dlouhými volnými drahami částic.
- 2) **vysokotlaké plazma** – s vysokou hustotou částic i srážkovou frekvencí a tedy velmi krátkými volnými drahami částic.

➤ **Budícího zdroje** - to může být stejnosměrné, pulzní nebo střídavé, které můžeme dále rozdělit na nízkofrekvenční, radiofrekvenční, mikrovlnné, . . . [12]

Plazmatické skupenství můžeme dále rozdělit na několik dalších skupin:

➤ **Běžné plazma:** elektronové obaly atomů jsou částečně poškozené (vysokou teplotou nebo tlakem). Volné elektrony jsou zodpovědné za plazmatické vlastnosti látky.

➤ **Termonukleární plazma:** atomární obaly neexistují, látka je směsicí holých jader a volných elektronů. V tomto stavu je plazma v jádrech hvězd, kde probíhá termojaderná syntéza.

➤ **Nukleonové plazma:** vysokou teplotou nebo tlakem jsou rozrušena sama jádra atomů. Látka je směsicí elektronů, protonů a neutronů. Nukleonové plazma se ve vesmíru objevilo v časech 10^{-5} s po vzniku, kdy se z kvarků tvořily první protony a neutrony. Nalezneme ho také ve vnějších obalech explodující supernovy, kde jeho vznik vyvolá stlačení plynů rázovou vlnou. V obálce krátkodobě probíhají překotné termonukleární reakce vedoucí ke vzniku těžkých prvků.

➤ **Kvark-gluonová plazma:** při vysokých energiích jsou roztaveny samotné nukleony na své konstituenty - kvarky a gluony. V tomto stavu byla látka asi do deseti mikrosekund po vzniku vesmíru a uměle se podařilo tento stav látky vytvořit v CERNu (Evropská laboratoř pro fyziku částic) v roce 2000. [3] [13]

Člověk dnes snadno dokáže vytvořit plazma i v laboratoři. Nejtypičtější příklady jsou:

- laserové plazma – doba života: $10^{-12} \div 10^{-9}$ s
- pulzní plazma – doba života: $10^{-9} \div 10^{-6}$ s
- tokamak – doba života: 1 s
- studené plazma – doba života: hodiny, dny, roky [13]

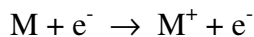
2.1.5 Elementární procesy v plazmatu

Jak již bylo řečeno, plazma je kvazineutrální plyn složený z iontů, elektronů a neutrálních atomů. Každá z těchto složek může interagovat s ostatními a také sama se sebou. Elementární procesy v plazmatu můžeme rozdělit na pět hlavních typů. Jsou to:

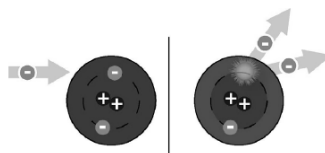
- 1) Ionizace molekul
- 2) Disociace molekul
- 3) Rekombinace molekul
- 4) Vznik a zánik negativních iontů
- 5) Iont-molekulové reakce [14]

2.1.5.1 Ionizace molekul

Ionizace je děj, při kterém jsou elektrony “vyraženy” z atomu nebo molekuly. [2]



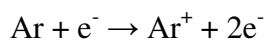
Výsledkem jsou kladně nabité částice = ionty, jejich pohyb lze ovládat působením elektrického pole (obr. 6). [2]



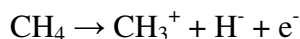
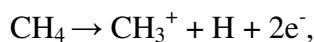
Obrázek 6: Neutrální a ionizovaný atom [2]

1) Ionizace elektronem

Zdánlivě jednoduchý typ ionizace, ale elektron může molekulu nejen ionizovat, ale i excitovat, nebo u víceatomových molekul, třeba i rozbít. Každý z těchto dějů má složité a jen obtížně měřitelné závislosti na energii, které je nutné znát (změřit nebo někde zjistit). [14]



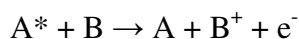
Pro víceatomové molekuly vzniká více kanálů s teplotně závislým procentuálním rozložením produktů: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_4^+ + 2e^-$,



... a mnoho dalších kanálů ionizace. [14]

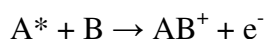
2) Ionizace molekulou

Molekula s dostatečnou kinetickou energií může ionizovat jinou molekulu. Je-li jedna z molekul v excitovaném elektronovém stavu (nebo je v metastabilním stavu), jedná se o Penningovu ionizaci a proces ionizace je pak mnohem pravděpodobnější. [14]

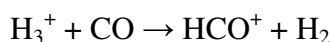


A^* - excitovaná molekula

Existuje také asociativní ionizace molekulou:



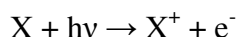
3) Ionizace pozitivním iontem



H_3^+ je velmi běžný iont, který rád předává H^+ , respektive proton, jiným molekulám. [14]

4) Ionizace fotonem

K uvolnění elektronu z atomu nebo molekuly může rovněž dojít při interakci atomu se světelným kvantem – fotonem (foton pohltí a uvolní valenční elektron) = fotoionizace. [11]



5) Termická ionizace

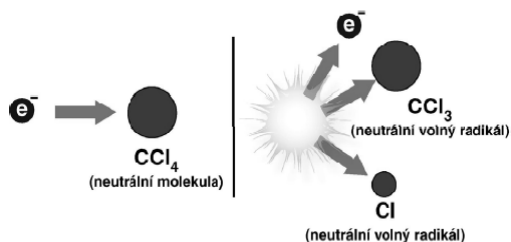
I při pokojové teplotě jsou některé molekuly vzduchu ionizovány. To je způsobeno přirozenou radiací, kosmickým zářením a termickou ionizací. Obsazení energetických hladin v molekulách elektrony má pravděpodobnostní charakter, který je závislý na teplotě. I při pokojové teplotě je nenulová pravděpodobnost výskytu plně ionizovaných molekul. Při vyšších teplotách se podíl termicky ionizovaných molekul zvyšuje. [14]

2.1.5.2 Disociace molekul

Disociace vystihuje děj, kdy elektrony při srážce s molekulou naruší vzájemnou vazbu mezi atomy a některý z atomů zcela uvolní. [10] Molekuly plynu se rozdělují na menší fragmenty = volné radikály. [2]

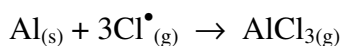


Volné radikály mají velkou energii, jsou nestabilní a ochotně reagují s jinými látkami, aby se staly stabilními viz. obr. 7. [2]



Obrázek 7: Na obrázku se generuje volný radikál Cl, stabilní je Cl_2 , samotný Cl je nestabilní [2]

Volné radikály chloru tedy budou reagovat např. s hliníkem.



Chemická rovnice popisuje spojení pevného hliníku s třemi volnými radikály chloru za vzniku plynného chloridu hlinitého [2]

2.1.5.3 Rekombinace molekul

Opačný proces disociace je rekombinace, tj. proces utvoření molekuly z jejich jednotlivých částí. [11]



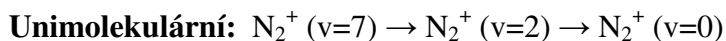
Chemická rovnice popisující spojení dvou volných radikálů za vzniku stabilního stavu (tetrachlormetanu) [2]

2.1.5.4 Vznik a zánik negativních iontů

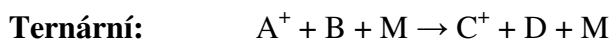
Existence stabilních záporných iontů, tj. iontů, které mají o jeden elektron víc než normální atom, není na první pohled samozřejmá. Proč by měl elektron obíhat kolem neutrálního atomu a tvořit tak s ním záporný iont? Kvantová (a i klasická) mechanika nabízí řešení, kdy energetická bilance takového iontu je skutečně výhodnější než bilance neutrálního atomu. Většina atomů (a molekul) tvoří záporné ionty. Energie nutná k odnesení dodatečného elektronu z takového iontu se nazývá elektronová afinita a je tabelována. Záporné ionty zanikají dodáním této energie, třeba pomocí photodetachmentu („vyražení“ přebytečného elektronu fotonem). [14]

2.1.5.5 Iont-molekulové reakce

Iont-molekulové reakce jsou obrovskou samostatnou kapitolou elementárních procesů v plazmatu. Jejich studiem se zabývá obor nazvaný plazmochemie. K popisu iont-molekulových reakcí se používá hlavně rychlostní konstanta reakce. Iont-molekulové reakce dělíme na:



v - vibrační kvantové číslo



Kde se molekula M reakce účastní jako katalyzátor. Většina z těchto reakcí má mnoho kanálů průběhu (různé produkty). [14]

2.1.6 Typy elektrických výbojů

Elektrický výboj je jev vznikající při průchodu elektrického proudu plynem. Podmínkou vzniku výboje je: existence volných nosičů náboje (elektronů a iontů) a elektrická energie dodávaná do plynu (elektrickou energii lze do plynu ve výbojce dodávat různými způsoby).

Výboje můžeme dělit na základě různých kritérií: délky jeho trvání, tlaku, typu buzení, přítomnosti ionizačního činidla. Pokud je nutná přítomnost ionizátoru, mluvíme o nesamostatném elektrickém výboji - výboj zanikne, když ionizátor přestane působit. V opačném případě jde o samostatný elektrický výboj - výboj se udrží vlastní ionizací. [14]

2.1.6.1 Zdroje nízkoteplotního plazmatu

Nízkotlaké plazmové výboje v dnešní době ukázaly, že jsou vhodné pro různé druhy povrchového zpracování zahrnující např. depozici tenkých vrstev, modifikaci povrchů, leptání atd. Používají se dvě základní uspořádání. První uspořádání je to, kde výrobek je mimo prostor výboje a dopadání aktivních částic je zajištěno prouděním plynu skrz výboj. Toto uspořádání je označováno jako „**downstream**“ a je využíváno pro doutnavé výboje. Druhé uspořádání je umístění výrobku přímo v oblasti výboje nebo v jeho těsné blízkosti. Někdy tvoří výrobek bariérovou izolační vrstvu a to je běžné pro bariérové výboje.

Během zpracování je nutné zajistit nízkou teplotu výboje, aby během zpracování nedocházelo k destrukci nebo tepelnému ovlivnění povrchu výrobku. Rozhodující vliv na výslednou teplotu výboje má termodynamická nerovnováha. Termodynamická nerovnováha označuje stav, kde teplota iontů a neutrálních částic je velmi nízká při porovnání s teplotou elektronů. [15]

Zdroje nízkoteplotního plazmatu se dělí:

- **Nízkotlaké plazmové výboje** – Radiofrekvenční výboj
Mikrovlnný výboj
- **Výboje za atmosférického tlaku** – Obloukový výboj

Jiskrový výboj

Korónový výboj

Doutnavý výboj

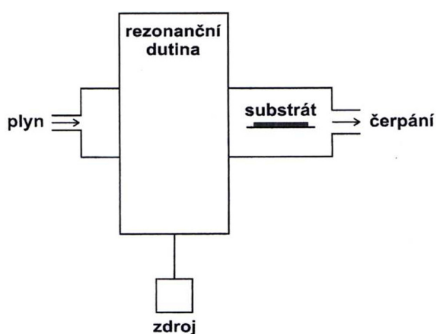
Dielektrický bariérový výboj

2.1.6.1.1 Nízkotlaké plazmové výboje

V průmyslu se používají soustavy pracující s malou (50-500 kHz), střední (13,56- 27,12 MHz) nebo velkou (915 MHz až 2,45 GHz – mikrovlnné soustavy) frekvencí výbojů. V současné době se převážně používají dva zdroje energie. První vytváří výbojové napětí o střední frekvenci ($f < 100$ MHz) a druhý o vysoké frekvenci ($f > 100$ MHz). Nevýhodou nízkotlakých plazmových výbojů je vysoká cena vakuového zařízení a dávkový provoz (látko se dá opracovávat jen v určitých dávkách), což výrazně zvyšuje cenu konečného produktu. [16]

➤ **Radiofrekvenční výboj** – má dvě hlavní výhody. První výhoda je, že díky měnící se polaritě může operovat s izolujícími materiály. Mezi druhou výhodou patří, že radiofrekvenční výboj může pracovat v tzv. bezelektrodevém uspořádání (elektrody jsou vně plazmové nádoby). Nejčastěji využívané frekvence jsou v rozsahu $f = 1-100$ MHz. Tyto výboje jsou rozdělovány pomocí mnoha parametrů např. podle umístění elektrod s ohledem k plazmové nádobě (dělí se na vnitřní nebo vnější elektrody), dále dle druhu zapojení elektrod (symetrické nebo nesymetrické zapojení) a také dle druhu zapojení výkonu a to na kapacitně vázaný výboj nebo induktivně vázaný výboj. [17]

➤ **Mikrovlnný výboj** – jedná se o bezelektrodevé uspořádání. Je charakteristický mikrovlnným zdrojem s frekvencí 2,45 GHz. Za nízkého tlaku dosahuje vysokého stupně ionizace. Výhoda tohoto výboje je, že upravený povrch není vystaven přímému vlivu plazmatu, jak je tomu na obr. 8 a tak je vhodný tento výboj použít pro tepelně citlivé materiály. [18]

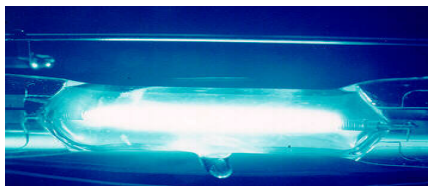


Obrázek 8: Mikrovlnný bezelektrodevý reaktor [18]

2.1.6.1.2 Výboje za atmosférického tlaku

Oproti nízkotlakým plazmovým výbojům jsou finančně výhodnější díky své jednoduchosti a nízkým provozním nákladům.

➤ **Obloukový výboj** - je samostatný výboj mezi elektrodami, charakteristický vysokými proudy a teplotami (tisíce kelvinů) mezi elektrodami, aby se vzduch ionizoval. Probíhá nejčastěji za atmosférického tlaku a používá se při obloukovém sváření kovů, na tavení apod. [14]



Obrázek 9: Detail obloukového výboje ve vysokotlaké rtuťové výbojce [20]

➤ **Jiskrový výboj** - je krátkodobý samostatný výboj, který vzniká při vysokém napětí mezi dvěma vodiči za atmosférického tlaku a je doprovázen zvukovými a světelnými efekty. Jiskra má podobu jasně svítících rozvětvujících se kanálků, ve kterých dochází k ionizaci při teplotě až 30 000 K. Nejznámějším jiskrovým výbojem je blesk, kterým se vyrovnává napětí (miliony voltů) mezi dvěma mraky nebo mezi mrakem a zemí. [14]



Obrázek 10: Jiskrový výboj ve formě blesku [14]

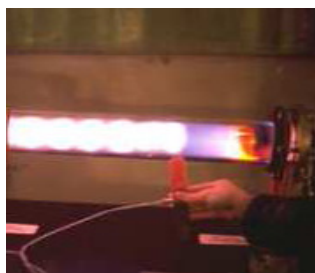
➤ **Korónový výboj** - je obvyklým jevem při atmosférickém tlaku. V přírodě vzniká například při bouřce na ostrých hranách listů nebo špičkách stromů, kde se projevuje světélkováním. Také v blízkosti vysokého vedení může dojít k vytvoření dostatečně silného elektrického pole nutného ke vzniku korónového výboje. [19] V laboratorních podmínkách zpravidla vzniká mezi dvěma elektrodami s vysokým potenciálovým rozdílem, tedy vysokým napětím a silným elektrickým polem. Prostor mezi těmito elektrodami je vyplněn plynem, ze kterého při vysokém výboji vzniká plazma. [6] Korónový výboj je nízkoenergetický bodový výboj. Termodynamická nerovnováha je u tohoto výboje zajištěna silnou prostorovou nehomogenitou elektrického pole. Vysoká

nehomogenita pole, zajišťuje urychlení elektronů na energii dostatečnou k ionizování molekul neutrálního plynu pouze v těsném okolí nabitých elektrod. Aktivní částice tento prostor opouštějí dříve, než stihnou dosáhnout teploty rovnovážné. V homogenním poli korónový výboj není stabilní, jelikož přechází do jiné formy výboje např. v obloukový výboj. Napětí potřebná pro vznik korónového výboje se pohybují v oblasti několika kilovolt. Korónový výboj se v současné době průmyslově využívá. Nevýhodou je malá rychlost zpracování vlivem nízké energetické hustoty. Další nevýhodou je daná vzdálenost výboje od zpracovávaného materiálu a z toho vyplývá nižší hustota aktivních částic. [15]



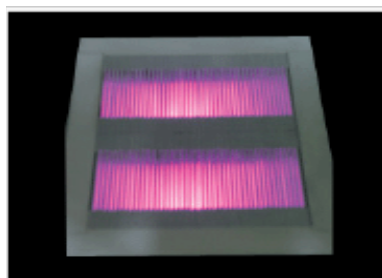
Obrázek 11: Korónový výboj [18]

➤ **Doutnavý výboj** - je samostatný výboj s viditelnou složkou, který lze pozorovat ve výbojkách (výbojových trubicích) za snížených tlaků. Probíhá při malých proudech (řádově miliampéry), teplota výbojky i elektrod je nízká. Doutnavý výboj (v xenonových, sodíkových, rtuťových výbojkách, v zářivkách) je úsporným zdrojem světla. Světlo výbojek je při daném příkonu asi 5krát intenzivnější než světlo klasických žárovek. Ve rtuťových parách v křemenných trubicích je doutnavý výboj zdrojem UV záření. [14] Mezi vlastnosti doutnavého výboje patří: radiální prostorová homogenita, stabilizace výboje je složitější než u koróny, pro udržení stabilního výboje je nutná vhodná atmosféra, např. helium, frekvence vyšší než 1kHz a jedna elektroda pokryta dielektrikem. Výhodou tohoto výboje je vyšší hustota energie než u koróny nebo dielektrického bariérového výboje. Mezi nevýhody patří vyšší nároky na stabilizaci a udržení výboje a citlivost na přítomnost nečistot. [18]



Obrázek 12: Doutnavý výboj [18]

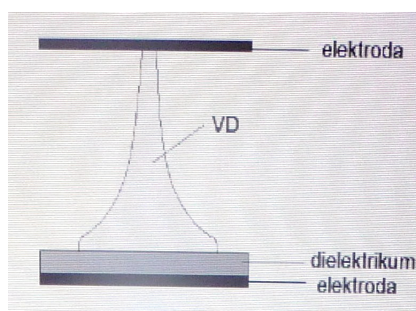
➤ **Dielektrický bariérový výboj** - hlavním znakem tohoto výboje, nazývaného také tichý výboj, je filamentární (vláknitý) charakter. Při atmosférickém tlaku se vytvoří spousta velice tenkých vláken s poloměrem okolo 100μm, které se v dolní části rozšiřují na povrchový výboj s poloměrem zhruba 0,5cm. Tyto „vlákna“ jsou náhodně rozmístěna po zpracovávaném povrchu a navzájem se neovlivňují. Výboj lze stabilně udržet od frekvence 50Hz. Alespoň jedna z elektrod musí být pokryta dielektrikem, ale vlastnosti dielektrika omezují množství energie ve výboji a to je nevýhodné. Hlavními výhodami tohoto výboje je snadná stabilizace a jednoduché zařízení. [16]



Obrázek 13: Dielektrický bariérový výboj [18]

Dielektrický bariérový výboj lze rozdělit podle uspořádání elektrod do třech základních typů: objemový, povrchový a koplanární.

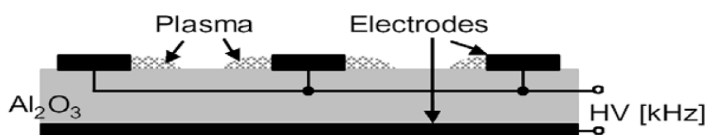
1) Objemový dielektrický bariérový výboj (Volume Discharge - VDBD) - zařízení se skládá z dvou paralelních elektrod, mezi kterými se generuje objemový dielektrický bariérový výboj (obr. 14.). Mikrovýboje vznikají v tenkých kanálech, které vyplňují mezelektrodový prostor a jsou většinou náhodně rozloženy na povrchu elektrod. [21]



Obrázek 14: Uspořádání objemového dielektrického bariérového výboje [21]

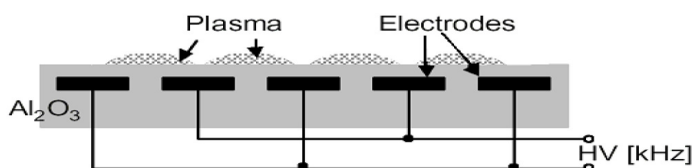
2) Povrchový dielektrický bariérový výboj (Surface Discharge - SDBD) - u tohoto výboje není žádná jasně ohraničená délka výbojového prostoru. Na rozdíl od objemových výbojů je u tohoto výboje nehomogenní elektrické pole mezi elektrodami. Takzvané mikrovýboje jsou v tomto případě spíše jednotlivé výbojové stupně, které se konají v tenkých vrstvách na dielektrickém povrchu a do určité vzdálenosti mohou být

považovány za homogenní. Zvýšené napětí okamžitě vede k rozšíření výbojového prostoru na dielektriku. Dielektrická bariéra je z keramiky (převážně Al_2O_3), na její vrchní straně jsou paralelně uložené kovové pásy elektrod. Na spodní straně je uložena plošná elektroda, která je uzemněná (obr. 15). [21]



Obrázek 15: Uspořádání povrchového dielektrického bariérového výboje [22]

3) Koplanární dielektrický bariérový výboj (Coplanar Discharge - CDBD) - tento druh výboje generuje nerovnovážné plazma při atmosférickém tlaku. V CD jsou výbojové elektrody uspořádány koplanárně, vloženy do dielektrické bariéry a touto bariérou zcela obklopeny (obr. 16). Výboj je buzen na povrchu dielektrické bariéry v ohraničeném mezielektrodovém prostoru. [12] Plazma, generované tímto typem výboje, je makroskopicky homogenní a tvoří na povrchu dielektrika vrstvu hlubokou několik desetin milimetru. Tento typ výboje má tu výhodu, že při zvyšování výkonu dodávaného do výboje nedochází k zvyšování nehomogenity výboje, ale dokonce dochází k jeho homogenizaci. V porovnání s povrchovým bariérovým výbojem je jeho výhodou neomezená životnost, protože plazma není v kontaktu s elektrodami a teda nedochází k jejich erozi. [14]



Obrázek 16: Uspořádání koplanárního dielektrického bariérového výboje [22]

2.1.7 Plazmatická úprava povrchů textilních materiálů

Plazmatická úprava je vhodná technologie pro úpravu povrchu materiálu. Na jedné straně je možné plazmatem upravit povrch na molekulární úrovni, takže bude schopen snadné vazby s jinými látkami. Na druhé straně je možné vhodnou volbou pracovního plynu pokrývat povrch novými vrstvami. Plazmatem lze tedy ovlivňovat povrch materiálu. To je možné díky vysoké energii elektronů, které jsou schopné

přetrhat chemické vazby. Úpravu lze využívat i pro čištění povrchů. Na povrch textilních materiálů se používají zdroje nízkoteplotního plazmatu. [23]

Princip úpravy je založen na změně chemických i fyzikálních vlastností povrchu polymeru. Plazma vzniká pod vlivem výbojů, k nimž dochází ve vakuové komoře nebo při atmosférickém tlaku. Výboje jsou generované rychle se měnícím energetickým polem v plynovém prostředí, které představuje nejčastěji kyslík, dusík, hélium, argon, xenon, chlor, fluor a vzduch. Minimální doba působení plazmatu na modifikované materiály je různá a pohybuje se průměrně od několika desítek sekund do několika minut. V plazmové komoře vznikají různé reaktivní částice, které působí na povrch substrátu a čistí ho, modifikují nebo vytvářejí povlaky podle nastavených procesních parametrů. [16]

Úprava probíhá jen v první molekulární vrstvě a díky tomu zůstávají mechanické vlastnosti materiálu beze změny. Nesmíme zapomenout podotknout nevýhodu plazmatické úpravy a to, že není trvalá. [6]

2.1.7.1 Základní procesy interakce plazmatu s vrchní vrstvou materiálu

Použití technologie nízkotlakého plazmatu umožňuje řadu rozdílných způsobů působení na vrchní vrstvy materiálu. Plazma proniká do hloubky kolem 10 μ m. K základním aplikacím nízkotlakého plazmatu patří:

- 1) Čištění povrchu materiálu
- 2) Moření vrchní vrstvy
- 3) Síťování molekul ve vrchní vrstvě
- 4) Vznik nových chemických struktur
- 5) Aktivace polymerů
- 6) Leptání povrchu
- 7) Povlakování

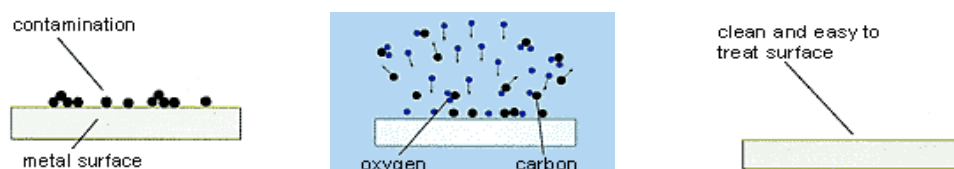
Faktory ovlivňující proces modifikace vrchní vrstvy:

- doba modifikace, tj. doba působení plazmatu na materiál
- energie [J/m²] a výkon [W/m²] na jednotku výbojů
- tlak a teplota ve výbojové komoře
- intenzita proudění a druh plynu
- elektrické napětí a frekvence výbojů

- teplota modifikovaného materiálu
- rozměry výbojové komory
- umístění modifikovaného výrobku v komoře
- druh a vlastnosti modifikovaného materiálu [18]

2.1.7.1.1 Čištění povrchu materiálu

Používá se na odstranění organických nečistot z vrchní vrstvy. Povrch je bombardován mikročásticemi, znečištění je odprášeno a následně odsáváno. Kvalitní čištění povrchu je způsob jak zvýšit adhezi. Doba působení plazmatu nutná pro čištění povrchu materiálů, činí v průměru několik desítek sekund. Používá se plazma vytvořené v kyslíkové atmosféře. [18] Schéma čištění povrchu je znázorněno na obr. 17.



Obrázek 17: Kovový povrch s nečistotami před úpravou; odstranění nečistot; povrch bez nečistot po úpravě [24]

2.1.7.1.2 Moření vrchní vrstvy

Používá se v případě silného znečištění vrchní vrstvy. Odstraňuje se tzv. tenká mezní vrstva a jisté fragmenty amorfní fáze. Nevýhodou procesu moření je, že způsobuje zvětšení drsnosti povrchu materiálu. [18]

2.1.7.1.3 Síťování molekul ve vrchní vrstvě

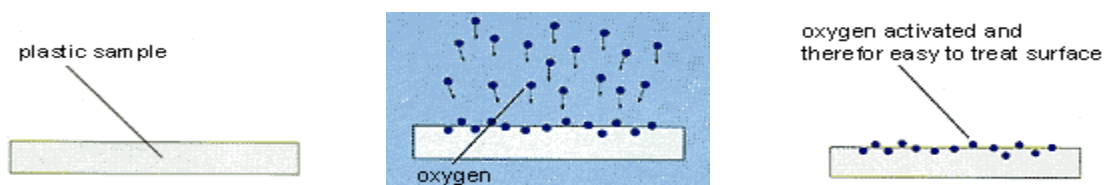
Proces síťování je jeden z nejdůležitějších účinků modifikace povrchu vrchní vrstvy, které mají vliv na zvýšení adheze. Jako pracovní plyn se používají atmosféry vzácných plynů (hélium, argon). Tento proces je vyvolán volnými radikály vznikajícími následkem bombardování vrchní vrstvy materiálu fotony ultrafialového záření o vlnové délce nižší než 175nm a ionty. Tyto částice snadno ničí vazby C-H nebo C-C, což iniciuje proces síťování. Během procesu síťování nevznikají nové funkční skupiny. Výhoda síťování je vznik struktury pevně spojené s podkladem a odolnost vrchní vrstvy vůči působení tepelné energie. [18]

2.1.7.1.4 Vznik nových chemických struktur

Vznikají nové chemické skupiny např. ketoskupiny, aldehydické, hydroxylové a karboxylové skupiny. Ve vrchní vrstvě materiálu během výbojů jsou příčinou změn chemických vlastností povrchu. Tloušťka vrstvy je ovlivněna změnou parametrů modifikačního procesu, tím lze získat velmi tenké vrstvy plazmového polymeru, které nepropustně pokrývají materiál (jejich tloušťka nepřevyšuje 10 μm). Nejčastěji používanými plyny jsou dusík (zdroj skupin NH_2 -, NH -, NH_3 -), kyslík (zdroj skupin -OH, -CO-, -COOH) a plyny obsahující halogenové skupiny. [18]

2.1.7.1.5 Aktivace polymerů

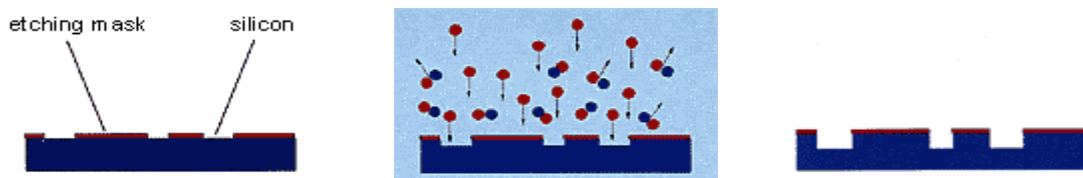
Plazmová polymerace je proces, při kterém aktivace par a plynů organických molekul vede k tvorbě polymerní vrstvy na substrátu. Dochází k ní ve vrchní vrstvě. Charakter polymerní vrstvy je silně závislý na podmínkách polymerace. Mezi tyto podmínky patří výkon výboje, průtok monomeru, tlak a umístění v reakční komoře. Základem plazmové polymerace je srážka zrychleného elektronu s monomerem a vzniku excitovaných fragmentů, volných radikálů (částice s elektronovým defektem - skupina atomů, vzniklá štěpením vazebných elektronových párů, obsahující jeden nepárový elektron) a iontů. Absorbované aktivované fragmenty vzájemně rekombinují a vytvářejí plazmový polymer ve formě tenké vrstvy. [18] Schéma působení kyslíkového plazmatu na povrch plastu je zobrazeno na obr.18.



Obrázek 18: Vzorek plastu před působením plazmatu; během působení plazmatu; po působení plazmatu [24]

2.1.7.1.6 Leptání povrchu

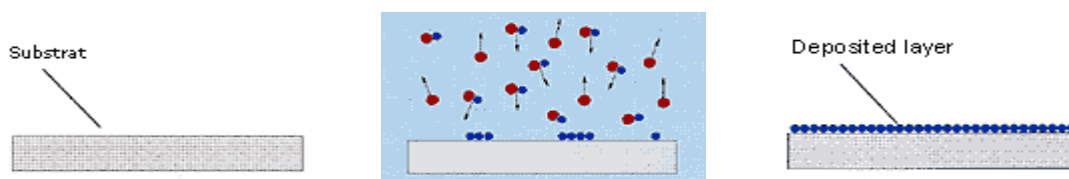
Plazmové leptání se používá pro odstranění povrchových látek z daného substrátu. Povrch je leptán reaktivním procesním plynem a materiál je prakticky odstraněn, odpařen a odsáván. Proto je plocha povrchu zvětšena a molekulová hmotnost výsledného materiálu snížena, což je vidět na následujícím schématu leptání povrchu (obr. 19). [24]



Obrázek 19: Křemík s leptací maskou před působením plazmatu; působení plazmatu; po působení plazmatu [24]

2.1.7.1.7 Povlakování

Povlakování je proces, kde kovová složka se převede z pevného do plynného skupenství buď: vakuovým napařováním, katodovým napařováním nebo reaktivním iontovým povlakováním. Vznikne povlak, který se nanese na povrch substrátu. Docílí se změn ve vlastnostech povrchu (chemická odolnost, tepelná i elektrická vodivost, reflexivita, odolnost proti vysokým teplotám, ořezuvzdornost, barevnost, vzhled atd.) Jako druhy povlaků se používají např. TiN, ZrN, CrN, TiAlN a jejich kombinace. [18] Schéma povlakování povrchu je znázorněno na obr. 20.



Obrázek 20: Před působením plazmatu; působení plazmatu; po působení plazmatu [24]

2.1.7.2 Vliv plazmatické úpravy v různých atmosférách

Na změně vlastností povrchu materiálu po úpravě má vliv použitý pracovní plyn v průběhu plazmatické úpravy. Používá se několik atmosfér a každá tato atmosféra má trochu rozdílné účinky na substrát. Následně je uvedeno několik typů atmosfér [6], jsou to:

➤ **Inertní plazma (argon, helium)** – štěpí chemické vazby (např. C-H, C-C, C=C). Na povrchu substrátu nebo v jeho blízkosti se generují volné radikály, které spolu reagují buď přímo (pokud je polymerní řetězec flexibilní) nebo díky migraci po polymerním řetězci. Dochází k zesíťování, větvení nebo k odstranění nízkomolekulárního povrchového materiálu, ale nedochází ke vzniku nových funkčních skupin. Dále lze získat při působení inertního plynového plazmatu lepší adhezivní síly rozhraní, zvýšení povrchové tvrdosti, ale i změna v drsnosti povrchu. [25]

➤ **Hélium/kyslíkové plazma** - polypropylen po plazmatické úpravě obsahuje na povrchu funkční skupiny: alkoholovou, ketonickou, karboxybenzensulfátovou, etherovou, esterovou nebo hydroperoxidickou. Zavedení polárních skupiny do polypropylenového vlákna umožňuje chemické vazby, například s molekulami barviva na rozdíl od nenaplazmovaného polypropylenu, který má silně hydrofobní povrch. [6]

➤ **Kyslíkové plazma** - modifikace s pomocí kyslíkového plazmatu rozšiřuje na povrchu vznik kyslíkových skupin: ketonických ($>C=O$), aldehydických ($-CH=O$) a karboxylových ($-C(=O)-OH$). Dochází k leptání povrchu, k zvýšení smáčivosti povrchu a ke zvýšení adheze. [6] Mezi další výhodné vlastnosti, kterých lze dosáhnout působením kyslíkového plazmatu, patří nešpinivá a antistatická úprava u PA, PE, PP, PET, PTFE, lepší mechanické vlastnosti (větší měkkost se stejnou pevností v tahu u bavlny a jiných celulóзовých vláken), nižší plstivost a lepší bělení u vlny, lepší vzlínavost při barvení u vlny a bavlny. [18]

➤ **Dusíkové/amoniakální plazma** – dusíkové a amoniakální plazma zavede amino skupiny ($-NH_2$) a další dusíkaté skupiny do povrchu přírodního nebo syntetického vlákna. [6] Dochází k růstu smáčivosti (u PA, PE, PP, PET, PTFE), adhezí pevnosti, nešpinivé a antistatické úpravě. Touto metodou se modifikují také materiály používané k lékařským účelům (krevní filtry nebo membránový mnohoúčelový filtr). Výhodou je menší míra degradace materiálu oproti zpracování v kyslíkovém plazmatu. [18]

➤ **Fluorové plazma** – plyny obsahující fluor (tetrafluormethan CF_4 , hexafluorethylen C_2F_6) mají za následek začlenění fluoru do povrchu substrátu a tudíž vzniká hydrofobizace povrchu. [6] Implantované atomy zabírají nejčastěji místa atomů vodíku nacházejících se v makromolekulách materiálů, jsou to např. PE, PP a PET. Tloušťka modifikované vrchní vrstvy dosahuje až 4 μm . Materiál, který ji tvoří, je nezesíťený a vyznačuje se zvýšeným obsahem krystalické fáze. Rychlost zvětšování úhlu smáčení během modifikace závisí na intenzitě proudícího plynu, jeho tlaku a intenzitě výbojů. [18]

➤ **Chlorové plazma** - tato metoda slouží k zlepšení smáčivosti materiálu. Lze tedy použít plazma generované v atmosféře různých plynů obsahujících atomy chlóru, např. tetrachlormetan (CCl_4), trichlormetan ($CHCl_3$), trifluorchlormetan (CF_3Cl), atd. Výhodou oproti kyslíkovému a dusíkovému plazmatu generovaných ve stejných podmínkách vede k větším změnám volné povrchové energie a úhlu zvlhčení PP. [18]

➤ **Vzduchové plazma** - je generované výboji, k nimž dochází v atmosféře vzduchu o sníženém tlaku. Zajímavé jsou účinky modifikace pomocí tzv. tichých výbojů ve

vzduchu. Jsou jistou obměnou korónových výbojů, ale s tím rozdílem, že jsou generovány mezi dvěma rovnoběžnými destičkami. Takové uspořádání výbojových elektrod způsobuje, že elektromagnetické pole vznikající mezi elektrodami je mnohem homogennější. Tiché výboje jsou méně destruktivní vůči modifikovanému materiálu. [18]

2.1.8 Vlastnosti a využití plazmatických úprav textilních materiálů

Mezi výhody plazmatické úpravy textilních materiálů řadíme:

- Možnost modifikace vrchní vrstvy výrobků složitých geometrických tvarů. Plazma se dostává do těžko dostupných míst modifikovaného výrobku, snadno vniká do štěrbin a otvorů.
- Modifikace a změna vlastností pouze tenké vrstvy výrobku bez změn vlastností hlouběji umístěného materiálu. Což umožňuje zachování všech výhodných vlastností výrobku, které mají význam při dlouhodobém využití. Týká se to zachování struktury a délky řetězců polymeru, který je základní složkou materiálu.
- Žádné vedlejší produkty modifikačního procesu škodící životnímu prostředí jako např. jedovaté plyny nebo agresivní kapaliny. Hlavními vedlejšími produkty jsou kyslík, oxid uhličitý a vodní.
- Možnosti modifikace vrchní vrstvy různých materiálů (polyolefinů, polyesterů, styrenových materiálů, fluorových materiálů, amidových a aminových materiálů atd.).
- Suché zpracování materiálu, což znamená, že po samotné úpravě nedochází k vypírání přebytečných chemikálií a sušení jak tomu bývá u mokrých procesů. Díky tomu tento proces není energeticky náročný a neovlivňuje životní prostředí
- Možnosti utváření různých vlastností vrchní vrstvy materiálu. Provádí se to příslušnou volbou základních podmínek modifikačního procesu a druhu plynu.
- Nízké náklady
- Vysoce flexibilní [18]

Mezi nevýhody plazmatické úpravy textilních materiálů řadíme:

- Nutnost provádět procesy modifikace ve výbojové komoře při velmi nízkém tlaku.

- Potřeba vybavení zařízení pro plazmovou modifikaci speciálními čerpacími soustavami, měřením tlaku a řízením.
- Výbojové komory musí mít speciální těsnění, rozměry komory omezující množství modifikovaného materiálu vkládaného do komory.
- Proces závisí na mnoha faktorech. Často neexistují výrazné souvislosti mezi těmito faktory a konečným efektem procesu. To ztěžuje a omezuje možnosti řízení procesu.
- Potíže s přenosem laboratorních poznatků na průmyslové podmínky. [18]

S využitím plazmatu lze tedy realizovat řadu pochodů a procesů na textilních substrátech:

- čištění povrchu vláken
- narušování povrchu pro zlepšení adhezních schopností vláken
- povrchové roubování různých látek např. příprava PP vláken s deodoračním účinkem roubováním ftalocianinů železa
- vytvoření funkčních skupin na povrchu vláken příkladem je povrchová modifikace PTFE snižující obsah fluoru v povrchových vrstvách a zlepšující smáčivost
- leptání povrchu vláken a tvorba třírozměrných periodických struktur
- zesíťení nebo rozvětvení makromolekulárních řetězců, které mohou kohezně zpevnit povrchové a podpovrchové vrstvy vláken
- aktivace povrchu vláken pro navazující chemické reakce [7]

2.2 Kompozity

2.2.1 Historie kompozitů

Z historického hlediska se u lidstva lze setkat s využíváním kompozitních materiálů pro stavbu stěn obydlí. Už ve starém Egyptě byly používány kompozitní cihly vyrobené ze směsi jílu (pojivo, matrice) a vyztužené kousky slámy nebo jiných rostlinných vláken (výztuž), které ve srovnání s čistě jílovými nevypalovanými cihlami byly méně křehké. [26]

Další oblastí, kde lidé využívali kompozitních materiálů od pradávna, byly zbraně - mongolské laminované luky, damašské dělové hlavně, japonské ceremonní meče apod. Největšího rozkvětu se kompozitům dostalo až ve dvacátém století, např. ve formě asfaltových granulačních směsí, pryže vyztužené černými sazemi, výrobků z pryže a plastů vyztužených skleněnými nebo jinými vlákny. [27]

V dnešní době se používají matrice na základě různých kovů, keramických, anorganických a polymerních materiálů vyztužené skleněnými, aramidovými, uhlíkovými a jinými vlákny, které mohou být dlouhovláknenné nebo krátkovláknenné. [28]

2.2.2 Kompozitní materiály

Kompozity jsou heterogenní materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více složek, a které se výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními popř. chemickými vlastnostmi. Kompozity mohou být typu kov-kov, keramika-kov, keramika-polymer, keramika-keramika a polymer-polymer. Kompozity mají ve srovnání s jednotlivými komponentami výrazně odlišné vlastnosti. Spojením těchto komponent vznikne zcela nový materiál s unikátními vlastnostmi. [26] Z toho vyplývá, že během návrhu a výroby kompozitního materiálu má být vyvolán *synergický účinek* v jeho struktuře tak, aby bylo možno získat nový materiál s lepšími vlastnostmi, než mají vlastnosti jednotlivých složek samy nebo ve směsi. [27] Tento efekt je označován za jednu z největších předností kompozitních materiálů.

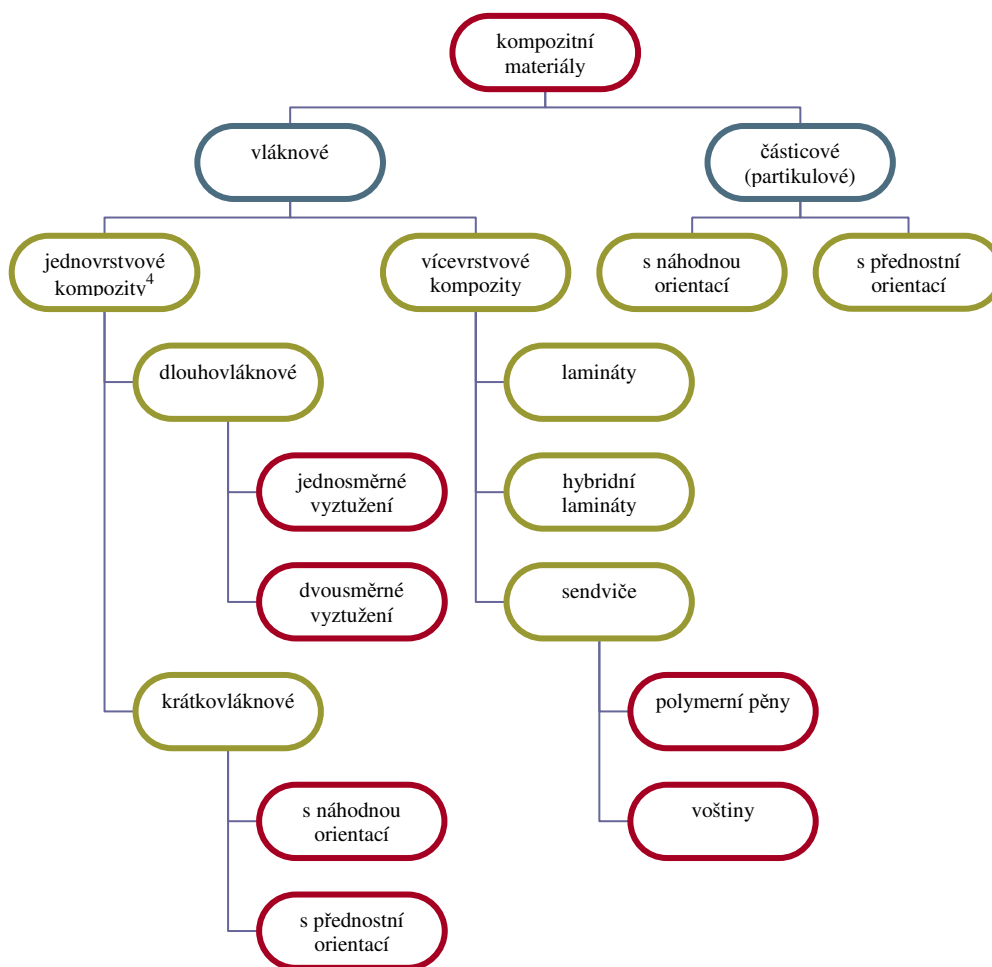
Komponentami většinou rozumíme jednu nebo více nespojitých fází, ponořených ve spojitě fázi. Diskontinuitní fáze je obvykle tvrdší a pevnější než fáze spojitá a označuje vyztužovací materiál, zatímco spojitá a většinou poddajnější fáze se nazývá matrice. Mezi těmito komponentami existuje pozorovatelné rozhraní.

Má-li tedy vzniknout kvalitní kompozit, je důležité vzájemné spolupůsobení fází, což nejčastěji zajišťují adhezní síly, méně často je to chemická vazba mezi komponentami. [29]

2.2.2.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Se vzrůstajícím použitím kompozitů existuje v dnešní době velké množství druhů kompozitních materiálů a nové stále vznikají, a proto je třeba je třídit do skupin.

Následující schéma popisuje rozdělení kompozitů podle geometrie a orientace výztuže, jelikož mechanismus kompozitního působení je závislý na geometrii vyztužujících částic.



Obrázek 21: Klasifikace kompozitních materiálů [29]

Partikulové kompozity – tyto kompozity jsou plněny částicemi, které jsou definovány jako nevláknenné útvary a nemají žádné dlouhé rozměry s výjimkou destiček. Velikost vyztužení udává její schopnost přispívat k vlastnostem kompozitu. Rovněž vyztužení s dlouhým rozměrem brání růstu počátečních trhlin kolmých k vyztužení, které by mohly vést k lomu, zejména u křehkých matic. Částice tedy nejsou při zlepšování lomové odolnosti příliš účinné. Materiál částic a matrice v partikulovém kompozitu mohou být v jakékoliv kombinaci kovových a nekovových materiálů. Volba přesné kombinace závisí na požadovaných konečných vlastnostech. [29]

Vlastnosti kompozitů jsou silně ovlivňovány vlastnostmi svých materiálových

⁴ Včetně kompozitů mající stejnou orientaci a stejné vlastnosti v každé vrstvě. [29]

složek, jejich distribucí a interakcí mezi nimi. Na vlastnosti kompozitů mají vliv i výztužné částice, jejich hustota a orientace, jsou-li částice podélného tvaru. Hustota diskrétních částic ve spojitě matrici se vyjadřuje objemovým nebo hmotnostním zlomkem (podílem), který považujeme za jeden z nejdůležitějších parametrů kompozitů. Rozložení částic pak určuje stejnoměrnost (homogenitu) nebo nestejnoměrnost (heterogenitu) kompozitů. Stejnoměrnost je další důležitý parametr pro popis kompozitů. Jestliže mají částice ve všech směrech stejné rozměry, vytvářejí izotropní kompozity. Pokud nejsou rozměry vyztužených částic ve všech směrech stejné, pak vytvářejí izotropní kompozity pouze při náhodné orientaci jejich částic. Jinak se tvoří kompozity anizotropní. V nich jsou již protáhlé výztužné částice orientovány. [30]

2.2.3 Vláknové kompozity

Vlákná jsou oproti částicím velmi účinným prostředkem při zlepšování odolnosti matrice vůči lomu, proto jsou vlákna více používanou výztuží. [29] Vláknové kompozity (textilní výztuž) se značí FRC z anglického fiber reinforced composites. Nejčastěji jsou vláknové kompozity spojeny polymerní matricí.

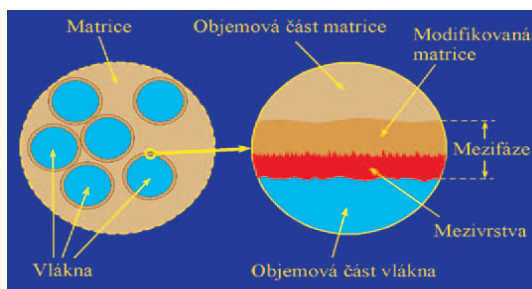
Vláknové polymerní kompozitní materiály jsou ceněny a používány pro svou lehkost při zachování vysokých hodnot pevnosti a tuhosti. Obecně platí, že mechanické vlastnosti kompozitu jsou závislé na procentuálním podílu vyztužující složky a jejich uspořádáním (orientací). Se stoupajícím obsahem vyztužující složky až do podílu 80% se mechanické vlastnosti zvyšují. [31] Jsou-li vlákna ke směru zatížení pod větším úhlem než 10° pevnost se snižuje. Pevnost je tedy úměrná procentu vychýlených vláken, v jejichž okolí je rozhodující pevnost matrice a adheze matrice s vlákny. [27]

Všechna vlákna musejí být dokonale smočena pojivem – pryskyřicí (matrice) a tím tvoří vláknový kompozit. Pryskyřice slouží k tomu, aby spojovala výztužná vlákna dohromady, chránila vlákna před nepříznivými vlivy (mechanickým a chemickým poškozením), zajišťovala prostorové uspořádání vláken v kompozitním materiálu a přenášela vnější zatížení do výztuže. Vlákna se proto na povrchu chemicky upravují tak, aby se na rozhraní mezi matricí a vláknem vytvořily pevné chemické vazby. [31]

Aby vyztužení bylo efektivní, je potřeba zajistit dobrou adhezi mezi vlákny a matricí a tím i dokonalý přenos síly z matrice na výztuž. V opačném případě by vyztužení nepřineslo žádaný efekt, neboť zatěžovací napětí by nemohlo být přenášeno z matrice na vlákna a docházelo by ke snadnému poškození kompozitního materiálu. [32]

Principem vlastního vláknového vyztužení je skutečnost, že vyztužující vlákna mají o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem (polymerní matricí). Tudíž se výztuž při vnějším namáhání deformuje méně než polymer. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer. Vlastnosti tenkých hraničních vrstev na rozhraní vlákno-polymer určují velikost přenosu veškerého napětí z nepevné matrice do vláken a odolnost celé kompozitní struktury vůči působení okolního prostředí. Tenké hraniční vrstvy říkáme mezivrstva a společně s modifikovanou částí polymerní matrice tvoří kompozitní mezifázi (obr. 22). [33]

V kompozitech s krátkými vyztužovacími vlákny je přenosová funkce matrice více kritická než v kompozitech se spojitými vlákny. [29] V případě dokonalé adheze (přilnavosti) mezi polymerem a vláknem nesou dlouhá vlákna veškerá napětí na kompozitním materiálu, takže nepevná, ale deformovatelná matrice je prakticky bez napětí. S nárůstem objemového podílu vláken v kompozitu a poklesem průměru vláken vzrůstá význam mezivrstev (mezifáze). Při obvyklém objemovém podílu vláken 30 - 60 % a průměru vláken 8 - 16 μm je vliv mezifáze na mechanické vlastnosti kompozitu dominantní. Špatná adheze vede ke ztrátě vyztužujícího efektu vláken a tedy ke snadnému poškození kompozitního materiálu. [33]



Obrázek 22: Schematické znázornění příčného řezu vlákny vyztuženého kompozitu (vlevo) a detail části mezi povrchem vlákna a matricí (vpravo). [33]

2.2.3.1 Vláknenná výztuž

Hlavní úlohou vláknenné výztuže v kompozitním materiálu je poskytovat pevnost, tuhost a teplotní stabilitu, ale i elektrické vlastnosti závisejí na výztuži. Vláknenná výztuž má nízký sklon k poruchám a vykazuje veliké změny v pevnosti než kovy. Vysokopevná vlákna jsou křehká. [28] Můžeme tedy říci, že typ výztuže má klíčový vliv na vlastnosti profilu. Nejběžněji používanými vlákny jsou skleněná, uhlíková a kevlarová (aramidová) vlákna. Skleněná vlákna dávají kompozitu všeobecně dobré vlastnosti a mají nízkou cenu. Kevlarová (aramidová) vlákna umožní, aby profil

odolával rázům. [32] Uhlíková vlákna obsahují nejlepší kombinaci vlastností (nízká hustota, nízký koeficient tepelné roztažnosti, zajišťují elektrickou vodivost, vysokou pevnost a tuhost), ale jsou dražší než skleněná nebo aramidová. [28] Vláknenné výztuže jsou dostupné ve všech geometrických formách od lineární přes plošné až k prostorovým. Kompozitní materiál obvykle obsahuje 30 - 70 % výztuže.

2.2.3.2 Matrice

Úlohou matrice je pevně držet vlákna ve správné pozici, chránit vlákna proti abrazi, roznášet napětí mezi vlákny, chránit vlákna před vnějšími vlivy. Většinou chrání křehká vlákna. Dále matrice určuje další vlastnosti, jako jsou elektricko-izolační vlastnosti, odolnosti proti teplotě, chemikáliím a vlhkosti. [28] V technologii polymerních vláknových kompozitů se používají jako matrice převážně reaktoplasty (termosetické pryskyřice), které během vytvrzovacího procesu vytváří nerozpustnou a netavitelnou zesíťovanou strukturu. Nejčastěji používané jsou nenasycené polyesterové pryskyřice, vinylestery, epoxidy a fenolické pryskyřice. V menší míře jsou i aplikovány termoplastické matrice. Z nichž se nejvíce užívají polypropylen, polyetylen, polyamid a aromatické termoplasty. Jejich mechanické vlastnosti, tvarovou stálost za tepla, oděruvzdornost a další hodnoty lze zvýšit kombinací resp. přidavkem vyztužujících vláken v množství 20 - 50 % hm. [31]

2.2.3.3 Rozhraní mezi vlákny a matricí

Rozhraní je přechodová oblast mikroskopických rozměrů. Jedná se o rozhraní kterýkoliv dvou fází. Fyzikální a chemické vlastnosti se v tomto rozhraní mění skokem. Rozhraní vzniká vlivem povrchových sil určených povahou a složením obou fází a má odlišné složení než obě fáze. Za ideální rozhraní je považováno takové, které je nekonečně tenké, těsné a bez poruch. Skutečné rozhraní má, ale komplikovanou chemickou a fyzikální strukturu. Rozhraní je specifické pro každý systém. Výrazně ovlivňuje konečné vlastnosti kompozitu např. lomovou houževnatost kompozitu a jejich vlastnosti v korozivním prostředí. Pro kompozity je důležitá struktura rozhraní a fyzikální vlastnosti rozhraní (mechanické – velký rozdíl mezi elastickými vlastnostmi vláken a matrice, napětí vzniklé v matrici se prostřednictvím rozhraní přenáší na vlákna; elektrické; optické; tepelné). Kompozity se slabým rozhraním mají relativně nízkou

pevnost a tuhost, ale vysokou odolnost vůči lomu. Naopak kompozity se silným rozhraním jsou vysoce pevná a tuhá, ale tvrdá a křehká. [34]

Povaha vazeb mezi vlákny a matricí je dána uspořádáním atomů, chemickými vlastnostmi vláken, konformací a chemickým složením polymerní matrice. Pevnost vazeb je zejména dána adhezí, která má pět hlavních mechanismů:

- Adsorpce a smáčení
- Vzájemná difuze (autohese)
- Elektrostatická přitažlivost
- Chemická vazba
- Mechanická adheze [34]

2.2.4 Typy vláknenných produktů jako kompozitní výztuž

Zde jsou uvedeny dosažitelné výrobní formy používané v kompozitních strukturách:

➤ **Rovingy (pramence, kabílky), příze** - jsou základní stavební jednotky téměř ve všech kompozitních výztužích. Forma výztuže je z nekonečných vláken, které mohou být nasekány, tkány, pleteny nebo naimpregnovány. Patří mezi nejlevnější výrobní formu a je dostupná ve všech vláknenných typech. Rovingy a kabílky jsou dodávány s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutu/m) pro výrobu prepregů, pro navíjení a pro výrobu profilu tažením (pultruzí). Zatímco příze mají mírný zákrut a používají se pro výrobu technických tkanin (geotextilie, filtrační a izolační tkaniny). [28]



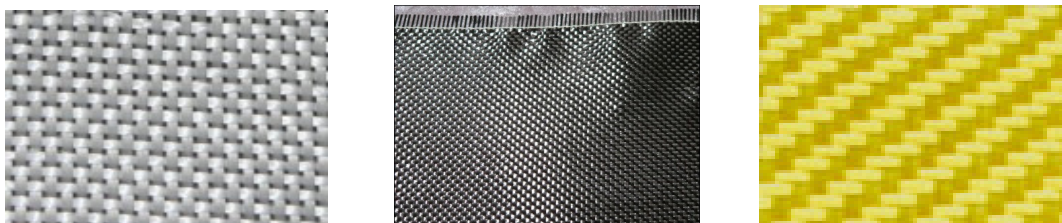
Obrázek 23: Skleněný, uhlíkový a kevlarový roving [34]

➤ **Sekané prameny** - jsou určeny pro přípravu lisovacích a vstřikovacích směsí, prameny jsou nasekány na potřebné délky. Dodávají se v pytlích.



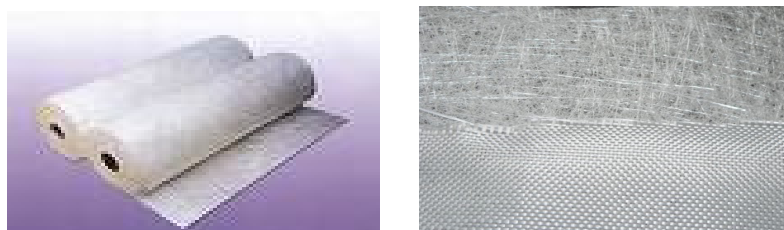
Obrázek 24: Sekaná skleněná vlákna [31]

- **Mletá vlákna** - mletím lze získat krátká vlákna jen v případě křehkých vláken.
- **Rovingové tkaniny** - tkané z rovingů. Jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů. [34]



Obrázek 25, 26, 27: Skleněná, uhlíková a kevlarová tkanina [34]

- **Rohože** - netkané textilie, rouna. Tvoří je v rovině ležící nahodile uspořádaná kontinuální nebo na větší délky (cca 50 mm) sekané prameny. Sekaná vlákna (25 až 50 mm) jsou v rohoži spojena polymerními pojivy, rozpustnými v pryskyřicích. Kontinuální vlákna v rohoži jsou vzájemně propletena a není zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivem. [34]



Obrázek 28, 29: Skleněná rohož; rozdíl mezi skleněnou tkaninou (dole) a rohoží (nahore) [34]

- **Prepregy** – Jsou různě široké role (nebo kotouče), obsahují buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož a polymerní matrici. Používají se k získání špičkových polymerních kompozitů.

- **Voštiny** – jsou určeny pro jádra sendvičových konstrukcí, s různou výškou, velikostí a tvarem buněk. Používá se jednak hliníková voština nebo voština z vláken aromatického polyamidu pojeného fenolformaldehydovou matricí. [34]

Sendvičové polymerní struktury se skládají z jádra ve středu a potahů (plášťů) na povrchu dílce. [31]



Obrázek 30: Voštiny z hliníku [31]

2.2.5 Vybrané výrobní metody vláknových kompozitů

Výrobní metody vláknových kompozitů se dělí podle typu formy:

- Otevřená (jednodílná) forma (OF)
- Uzavřená (dvoudílná) forma (UF)

Výběr kompozitní formy závisí na typu výztuže (krátká vlákna, dlouhá vlákna, 2D textilie - tkaniny, rohože apod.) a způsobu odpařování reaktivního rozpouštědla pryskyřice (důležité zejména u levných polyesterových a vinylesterových pryskyřicích). [34]

U vláknových kompozitů je hlavním problémem vložení vláken do matrice tak, aby se mechanicky nepoškodila, aby bylo zachováno přesné usměrnění a rovnoměrné rozdělení vláken ve výrobku, a aby byla zajištěna soudržnost vláken a matrice. Vláknům se mohou relativně snadno mechanicky porušit při každé manipulaci, a to i prostým dotykem dvou vláken nebo třením, poškrábáním, dotykem náradí atd. Je tedy důležité během výroby s nimi zacházet opatrně, aby se zachovaly jejich vlastnosti i v kompozitu. [27]

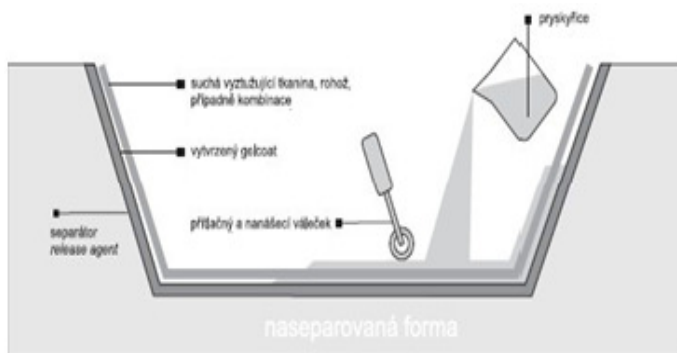
2.2.5.1 Výrobní metody s otevřenou formou

Ruční kladení (hand lay-up)

Nejstarší, nejjednodušší a dosud nejrozšířenější technologie, patří mezi tzv. otevřené technologie. Jde o proces, ve kterém je nanášení pryskyřice i výztuže prováděno ručně na vhodný povrch pozitivní nebo negativní formy (negativní - matrice nebo pozitivní - patrice). Forma se nejdříve povrchově upraví separačním činidlem a pak se opatří gelcoatem. Gelcoat je speciálně formulovaná, většinou probarvená nevyztužená povrchová vrstva o tloušťce 0,3-1mm. Nanáší se ručně nebo stříkáním a zajišťuje jednak estetickou stránku povrchu dílce a jednak tvoří ochranu vůči okolnímu prostředí (voda, povětrnost, chemická media). Po částečném vytvrzení gelcoatu se kladou jednotlivé vrstvy výztuže, které se prosycují iniciovanou pryskyřicí pomocí štětce nebo nanášecím válečkem a pak se přebytečná pryskyřice a vzduchové bubliny vytlačují rýhovanými válečky. Tyto dva kroky jsou opakovány tak dlouho, až je vytvořena požadovaná tloušťka stěny. Tento postup výroby je zobrazen na obr. 31. Vytvrzení probíhá v klidu za normální teploty většinou bez aplikace tlaku. Posledním krokem je vyjmutí z formy. [31]

Výhodami ručního kladení jsou především jednoduchost technologie, minimální

náklady na nástroje a prakticky neomezená variabilita tvaru a velikostí. Flexibilita konstrukce, možnost jednoduše aplikovat gelcoat a jednoduché dokončovací operace jsou největšími výhodami tohoto výrobního procesu. Nevýhodou je nereprodukovatelnost odpadu, který lze jen těžko znovu zpracovat, relativně velký objem odpadu, náročnost na lidskou práci, pouze jeden kvalitní povrch, malá produktivita a kvalita výrobku silně závislá na zkušenostech a schopnostech pracovníka. [36]

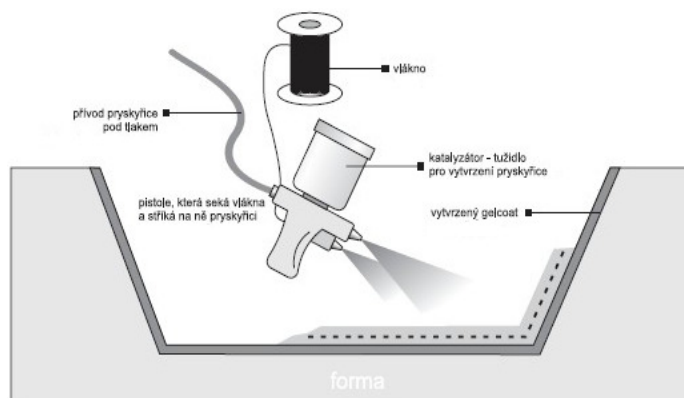


Obrázek 31: Schéma výroby ručního kladení [31]

Stříkání (Spray-up)

Tato metoda je podobná ručnímu kladení, ale je cenově výhodnější. Dále lze dosáhnout větších složitějších dílů než u ručního kladení (jako jsou panely, lodě, zásobníky atd.) Principem této metody je nanést na formu pomocí speciální pistole zároveň nasekaný roving a iniciovanou pryskyřici (obr. 32). [28] Jako první bývá aplikována – ručně nebo nástřikem – gelcoatová vrstva. Vlastní stříkání se provádí v několika vrstvách „mokrě do mokrého“ v závislosti na požadované tloušťce výrobku. Každá vrstva nanesené směsi se zhušťuje rýhovanými nebo štětinovými válečky různé velikosti a tvaru, přičemž se zároveň vytlačí vzduchové bubliny. [31]

Výhodou tohoto výrobního postupu je jeho přenosnost, nízká cena zařízení. Pokud je proces automatizován, je produktivita poměrně dobrá a rovněž reprodukovatelnost výrobků. Není žádné omezení velikosti výrobku. Nevýhodami jsou především nesnadné dosažení přesných tolerancí a vlastnosti materiálů jsou horší než u jiných technologií. Požadavky na kvalitu a schopnost pracovní síly jsou poměrně vysoké. [36]

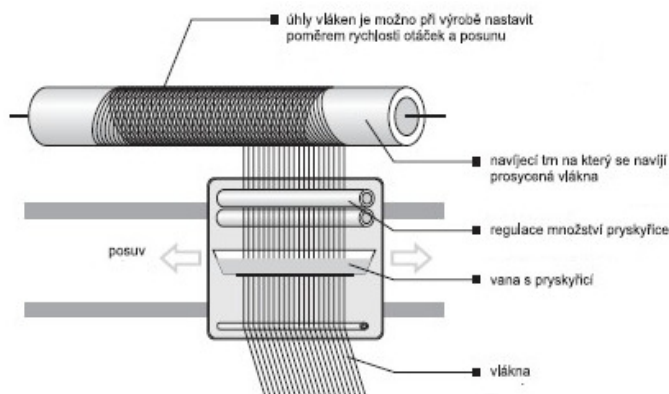


Obrázek 32: Schéma výroby stříkáním [31]

Navíjení (Filament winding)

Tato technologie je založena na kontinuálním navíjení svazku vláken či jinak upravených výztuží na kruhovou formu. Vlákná jsou navíjena buď již navlhčena pryskyřicí (obr. 33) nebo se provlhčují až po navinutí. Požadovaných vlastností kompozitu se dosahuje přesným uspořádáním a orientací pramenců vláken a výztuží. Vytvrzení se provádí na jádře v peci při neustálé rotaci. Po vytvrzení je jádro vyndáno a výrobek je dokončen.

Výhodou je, že proces má poměrně velmi dobrou produktivitu a může být vysoce automatizovaný. Hodí se především pro výrobu potrubí, kolen, zásobníků paliv atd. Poskytuje výrobky s vynikajícími fyzikálními vlastnostmi. Není žádný limit na délku vyráběných trubek, s výhodou se tohoto procesu používá pro výrobu tlakových nádob. Použití je i pro vyztužení pušek a pro sportovní potřeby (hůlky, rybářské pruty). Nevýhodami je vysoká cena navíjecích strojů, nesnadné odstraňování vnitřních forem a poměrně nízká produktivita u výroby tlakových nádrží, kde je nutno používat některé speciální postupy. [36]

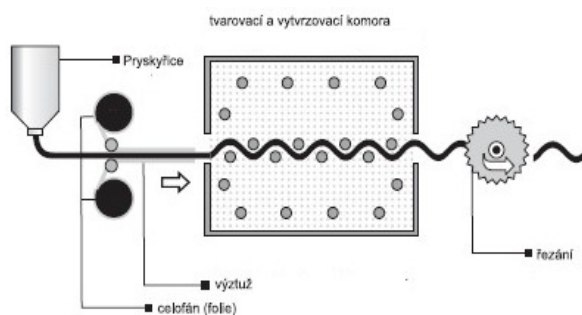


Obrázek 33: Schéma výroby navíjením [31]

Kontinuální laminování (Continuous lamination)

Tato metoda je jedna z nejstarších a byla v plné míře rozvinuta i v ČR. Celý proces spočívá v tom, že se na kontinuální lince pohybující se nějakou předem stanovenou rychlostí deponuje výztuž, pryskyřice i všechny katalyzátory a aditiva i separační fólie, celá směs se kontinuálně tvaruje a následně i vytvrzuje. Na konci linky dochází k řezání vytvrzeného profilu a odstranění separační fólie. [36] Tento postup výroby je znázorněn na obr. 34.

Mezi hlavní výhody patří možnost vyrábět „nekonečnou“ délku profilu o daném průřezu, je možno vyrábět různé tloušťky, nízké náklady a minimální odpad nastává při naběhnutí kontinuální výroby. Mezi nezanedbatelné výhody tohoto procesu patří i oboustranně kvalitní povrch. Vysoká cena výrobního zařízení je jednou z hlavních nevýhod tohoto procesu výroby. Je třeba vyrábět kontinuálně a ve velkých objemech, aby se investice do technologie vrátila. Velmi nesnadno se mění tvar vyráběného dílu. Hlavními aplikacemi jsou střešní krytiny, různé dělicí příčky, kapotáže klimatizace, atd. [36]



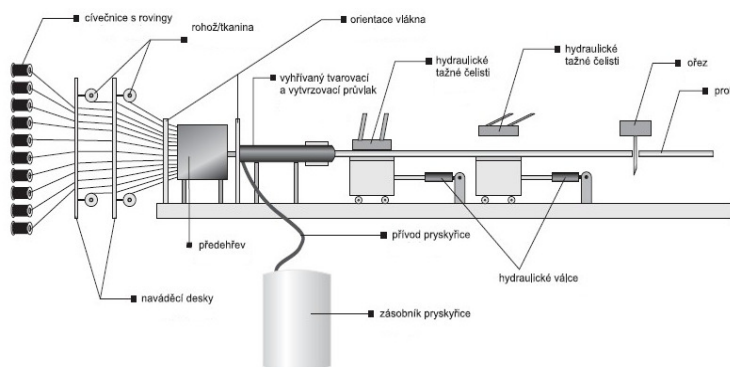
Obrázek 34: Schéma kontinuálního laminování [31]

2.2.5.2 Výrobní metody s uzavřenou formou

Tažení (Pultruze)

Pultruze je kontinuální, automatizovaná metoda uzavřeného tváření, která se používá v komerčních aplikacích od roku 1950. Vyztužující materiál, převážně se používá skelné vlákno, je ve formě rovingů nebo plošných rohoží. Tato vlákna jsou tažena z cívek do srovnávače, jehož funkcí je rovnoměrné rozmístění rovingů v průřezu a správné umístění rohoží. Dále je výztuž přivedena do pryskyřičné lázně, kde je smočena v tekuté pryskyřici. Po výstupu z lázně má polotovar už podobný tvar jako výsledný profil. Potom probíhá postupné tvarování a vytvrzování profilu. Nakonec je profil řezán pilou na požadovanou délku. [28] Celý postup výroby je ukázán na obr. 35.

Největšími výhodami pultruze jsou výrobky velmi dobrých vlastností, prakticky neomezená variabilita tvaru průřezu, nekonečná délka vyrobeného profilu, vysoká produktivita, minimální nároky na lidskou práci, vysoký stupeň automatizace. Mezi nevýhody patří poměrně velké investiční náklady na pořízení technologie, relativně drahý provoz, nutnost velmi kvalitního řídicího systému. [36]



Obrázek 35: Schéma výroby tažením [31]

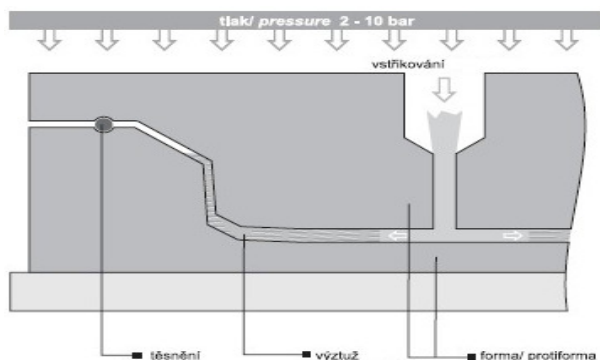
Podobná technologie jako Pultruze je tzv. **Pulforming** s tím rozdílem, že se dají vyrobit zakřivené profily.

Vysokotlakové vstřikování (RTM- resin transfer moulding)

Patří mezi rozšířené technologie pro výrobu textilních kompozitů. Formy jsou robustní konstrukce, aby snesly vysoké vnitřní tlaky. Do formy, opatřené gelcoatem, se vyskládá suchá výztuž dle konstrukčního návrhu. Vyztužující materiál, ať už na bázi skleněných nebo jiných vláken, musí mít strukturu umožňující snadný tok pryskyřičného systému, aby se dosáhlo úplného prosycení v krátkém čase. Forma se poté uzavře vrchním dílem podobně tuhé konstrukce a zajistí rychloupínacím systémem. Do vstřikovacího otvoru se umístí pistole, kterou se přivádí pojivo pod tlakem. Pojivo se vstřikuje tak dlouho, pokud nezačne vytékat z kontrolních otvorů na okrajích formy a to znamená, že výztuž je zcela prosycena v celém objemu dílce (obr. 36). Po úplném vytvrzení se forma otevře a díl je vytažen. [31]

Výhodou RTM metody je to, že je možno vyrobit kompozitní díly, které mají po obou stranách dobrý povrch, přičemž například barva může být na každé straně jiná. Velmi přesně je také možné řídit tloušťkové tolerance. Další výhodou je výroba poměrně velkých plošných výrobků 5-19 m². Mezi nevýhody patří nutnost velmi těžkých a drahých kovových forem, není možné dosáhnout vysokého obsahu skla, a proto jsou fyzikální vlastnosti těchto materiálů nižší než u jiných procesů a většinou se

FRC díly vyrobené touto metodou nepoužívají v konstrukčních aplikacích jako nosné prvky. [36]



Obrázek 36: Schéma vysokotlakového vstřikování [31]

Následující variantou výrobního procesu je **Vakuo-injekční technologie (VARTM-vacuum injection technology)**. Tato technologie je modifikací předchozí technologie RTM. Místo vstřikování pryskyřice pod tlakem napomáhá vakuum. [28] Výhodou této technologie je díky nižším tlakům možnost konstruovat formy méně robustní, což umožňuje výrobu i větších dílců. [31]

Další druhy výroby s uzavřenou formou:

SCRIMP (seemann composite resin infusion moulding process) - jedná se o analogii RTM. Pro výrobu velkoplošných výrobků např. chladírenské vagóny, čluny, lodě, karosérie autobusů.

IM (injection moulding) - pro krátkovláknové kompozity. Vstřikování směsi pryskyřice a krátkých vláken do formy.

SRIM (structural reinforced injection moulding) - vstřikování pryskyřice do formy s předem umístěnou výztuží.

BMC (bulk moulding compound) - lisování směsi reaktoplastu a krátkých vláken. [34]

2.2.6 Unikátní vlastnosti vláknových kompozitů

Při navrhování kompozitních materiálů se uvažují především specifické vlastnosti jednotlivých složek a tím vzniká možnost vytvořit kompozit pro daný účel. Tyto specifické vlastnosti přinášejí řadu výhod v porovnání s klasickými materiály, u kterých jsou jen těžko splnitelné. Jde zejména o tyto vlastnosti:

- zvýšení tuhosti (zvláště specifické tuhosti - poměru Youngova modulu a hustoty)

- pevnosti (zvláště specifické pevnosti - poměru meze pevnosti a hustoty)
- nízká měrná hmotnost (4 x lehčí než ocel, o 50 % nižší než hliník)
- zvýšení rozměrové stability: 3x nižší tepelná roztažnost než ocel
- zvýšení korozní nebo chemické odolnosti
- zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti)
- zvýšení teplotní stability (rozšíření teplotního intervalu použitelnosti)
- vynikající tepelné a elektrické izolační vlastnosti (zvýšení resp. snížení elektrické vodivosti)
- zvýšení mechanického tlumení (antivibrační a antihlukové materiály)
- snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny
- možnost probarvení ve hmotě, není potřeba dále natírat
- zmenšení teplotní roztažnosti
- snížení negativního dopadu na životní prostředí
- dlouhá životnost [37]

2.2.7 Vliv plazmatu na vláknové kompozity

Hlavním cílem použití plazmatické úpravy vlákna nebo whiskeru⁵ je tvorba pevné vazby mezi výztuží a matricí. Díky tomu vzniká pevný kompozit. Dochází k výraznému zpevnění vrstvy mezi vlákny a matricí bez ovlivnění mechanických vlastností. Pevnost vazby je dána zejména adhezí, která je hlavním faktorem přenosu napětí z matrice do vlákna.

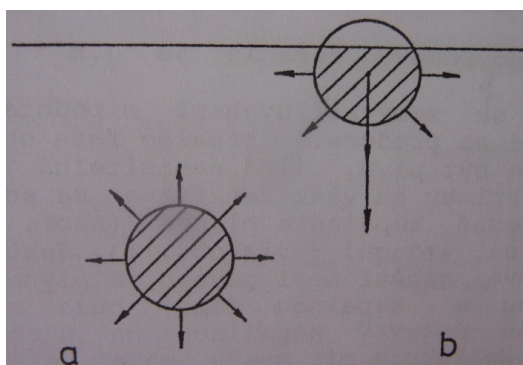
Zlepšení adheze mezi polymerní matricí a plazmatem upravenými vlákny je způsobeno fyzikálními a chemickými modifikacemi. Fyzikální modifikace je zdrsňování povrchu vlákna odleptávacím efektem. Vytváří se větší plocha, která zvětšuje tření mezi vláknem a matricí. Dochází tedy k zesílení mechanického spojení mezi vláknem a matricí. Chemická modifikace spočívá v implantování aktivních polárních skupin na povrch vlákna. Zvětší se povrchová energie podporující chemické spojení mezi vlákny a polymerní matricí. Vznikají tedy pevné kovalentní vazby mezi vláknem a matricí. [9]

⁵ Whiskery – monokrystalová tenká vlákna o velmi malých příčných rozměrech, dosahující velmi vysoké pevnosti (řádově 10^4 MPa) [34]

2.3 Povrchové napětí a povrchová energie, smáčení a adheze

2.3.1 Povrchové napětí a povrchová energie

Kapaliny se chovají tak, jako kdyby byl jejich povrch pokryt tenkou pružnou vrstvou, která se snaží stáhnout povrch kapaliny do útvaru s minimálním povrchem. Pokud na kapalinu nepůsobí vnější síly, zaujímá kapalina kulový tvar, neboť koule má ze všech těles stejného objemu nejmenší povrch. Téměř kruhový povrch se vytváří i v případě, jsou-li vnější síly velmi malé proti silám povrchovým. [38] Jak vyplývá z obr. 37, je vektorový součet mezimolekulových sil působících na molekule a) nulový, zatímco výslednice těchto sil působících na molekule b) u povrchu částečně vtahuje molekulu do vnitřku částice. [39]



Obrázek 37: Schéma k pojmu povrchového napětí: a - molekula uvnitř, b - molekula na povrchu [39]

Povrchová vrstva se snaží stáhnout na nejmenší velikost, je v ní tedy napětí, které nazýváme **povrchové napětí γ** . Je definováno jako síla v rovině povrchu, kterou působí jednotková délka mezifází proti snahám o zvětšení mezifází. Pokud je povrchové napětí kladné, je požadována kladná práce k rozšíření povrchu. Následkem toho kapičky kapaliny spontánně inklinují k tvorbě kulových tvarů, které poskytují minimální plochu povrchu.

Povrchová energie je definována jako energie, kterou je třeba dodat k zvětšení mezifází o jednotkovou plochu. Povrchové napětí i povrchová energie popisují stejný jev a mají i stejný rozměr ($\text{N.m}^{-1} = \text{J.m}^{-2} = \text{kg.s}^{-2}$).

Termín „povrchové napětí“ se používá častěji pro kapalinová mezifází (LL, LG). „Povrchová energie“ se používá zejména při popisu mezifází tvořícího povrch pevné látky (SS, SL, SG). Oba termíny jsou z fyzikálního hlediska zaměnitelné. [38]

2.3.2 Teorie smáčení

Schopnost smáčení pevného tělesa kapalinou je posuzována podle velikosti povrchového, resp. mezipovrchového napětí, resp. podle velikosti úhlu smáčení.

Smáčením se rozumí roztékání kapaliny (tedy pojiva v tekutém nebo viskoznětekutém stavu) po povrchu tuhé fáze, při čemž dochází ke snížení jeho povrchové energie. Na fázovém rozhraní látka tuhá – kapalná, existuje rovnováha sil dle obr. 38, která je dána vztahem tzv. Youngova rovnice. [40]

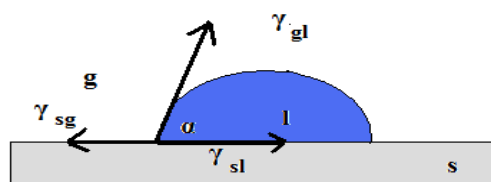
$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{GL} \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

kde: γ_{SG} - mezipovrchové napětí na rozhraní pevná látka – plyn [$\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$]

γ_{SL} - mezipovrchové napětí na rozhraní pevná látka – kapalina [$\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$]

γ_{GL} - mezipovrchové napětí na rozhraní plyn – kapalina [$\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$]

$\cos \alpha$ - smáčecí úhel



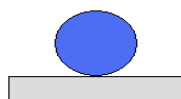
Obrázek 38: Rovnováha na fázovém rozhraní

Jestliže je v této soustavě povrchové napětí mezi pevnou a plynnou fází větší než mezi pevnou a kapalnou fází, bude snaha soustavy zvětšovat povrch pokrytý kapalinou na úkor povrchu pevná látka – vzduch. Kapka bude mít snahu smáčet větší povrch a úhel α , který je mírou smáčivosti se bude zmenšovat. [39]

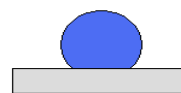
Z Youngovy rovnice lze odvodit jednoduchý vztah pro smáčecí úhel α .

$$\cos \alpha = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{GL}} \quad (7)$$

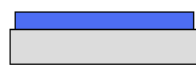
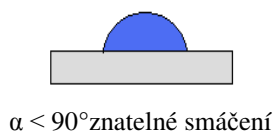
Podle velikosti smáčecího úhlu může tvar kapky nabýt různé podoby a velikost dotykové plochy tuhé a kapalné fáze se může značně lišit. Typické případy znázorňuje obr. 39. [40]



$\alpha = 180^\circ$ úplná hydrofobizace, odperlování vodních kapek



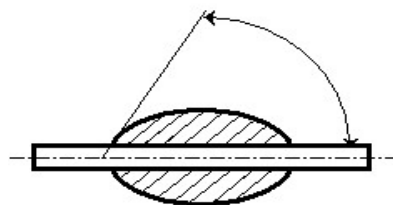
$\alpha > 90^\circ$ špatné smáčení



$\alpha = 0^\circ$ úplné smáčení

Obrázek 39: Tvary kapek při úhlech smáčení

Velikost úhlu smáčení α závisí na rozdílu povrchového napětí stěny pevného povrchu vzhledem ke kapalině a vzhledem ke vzduchu. Rozdíl povrchového napětí (ke kapalině a ke vzduchu) se nazývá adhezní konstanta. Je-li adhezní konstanta kladná, je úhel α ostrý, kapalina smáčí stěnu, jeví tzv. kapilární elevaci. Je-li adhezní konstanta záporná, je úhel α tupý, kapalina stěnu nesmáčí, jeví tzv. kapilární depresi. [40]



Obrázek 40: Zobrazující smáčení vlákna

V případě dokonalému smáčení vlákna kapalinou (viz obr. 40) dojde tehdy, když celková povrchová energie W vnějšího povrchu filmu kapaliny a povrchu styku mezi vláknem a kapalinou připadající na délku vlákna L bude menší, než povrchová energie téže délky suchého vlákna W_f . [48]

Pro povrchové energie W a W_f platí:

$$W_f = 2\pi b L \gamma_p \quad (8)$$

$$W = 2\pi b L \gamma_{kp} + 2\pi(b + e)L\gamma \quad (9)$$

kde: W_f – povrchová energie mezi filmem kapaliny a vláknem

W – povrchová energie suchého vlákna

b – poloměr vlákna

L – délka vlákna pokrývajícím kapalinou

e – tloušťka kapaliny

γ_p – povrchové napětí vlákna

γ_{kp} – povrchové napětí mezi kapalinou a vláknem

γ – povrchové napětí na povrchu kapaliny

Z výše uvedené podmínky pro dokonalé smáčení vlákna plyne: [48]

$$W_f - W = 2\pi L b \left[\gamma_p - \gamma_{kp} - \left(1 + \frac{e}{b} \right) \gamma \right] > 0 \quad (10)$$

Proces smáčení vláken kapalinou je rozebrán i v literatuře [49].

Dobré smáčení je nezbytnou podmínkou při přípravě moderních vláknových kompozitů s různými druhy vysokopevnostních vláken a polymerních matricích, neboť jediným způsobem výroby (bez porušení křehkých vláken) je impregnace svazků vláken tekutou matricí. Impregnace nemůže být uskutečněna bez dokonalého smočení vláken a matrice nesmí přitom korodovat nebo jinak degradovat vlákna. [27]

2.3.3 Teorie adheze

Adheze vzniká působením přitažlivých sil, kterými se poutají dva povrchy navzájem, tj. povrch spojovaného materiálu a adheziva. Adheze označuje přilnavost různých materiálů, zatímco koheze označuje jejich soudržnost. Mezi spojeným materiálem a pojivem vzniká vazba, kterou charakterizují adhezní síly, jež je možnost odvodit z měření rovnováhy adsorpčních energií termodynamickými metodami.

Adhezní síly mezi dvěma fázemi (A, B) kvantitativně vyjadřují adhezní práci (W_a). Je to práce potřebná k překonání soudržnosti dvou různých povrchů (fází) o jednotkovém průřezu 1cm^2 . [40]

$$W_a = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (11)$$

kde: W_a – adhezní práce

γ_A – povrchové napětí pro fázi A

γ_B – povrchové napětí pro fázi B

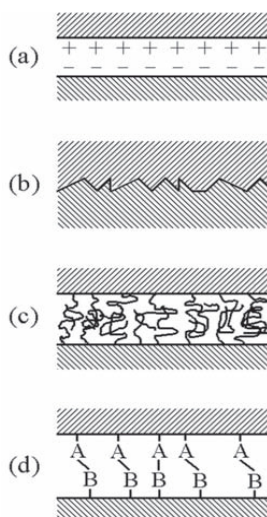
γ_{AB} – mezi povrchové napětí fáze A a B

Prvním předpokladem dobré adheze je těsný (na atomární úrovni) kontakt povrchů dvou materiálů a s ním související smáčivost povrchů charakterizovaná povrchovou energií. Povrchové energie vláken a polymerních (kapalných) matric jsou obecně známy. V systémech, kde povrchová energie vláken je mnohem větší než povrchová energie matrice, je velmi pravděpodobné dobré smáčení vláken polymerem.

Například skleněná (560 mJ.m^{-2}) a uhlíková (70 mJ.m^{-2}) vlákna by mohla být dobře smáčená polyesterovými a epoxidovými (43 mJ.m^{-2}) pryskyřicemi.

Dalším faktorem, který ovlivní kvalitu adheze, je druh vazby mezi dvěma stykovými plochami. Při těsném kontaktu povrchů dvou materiálů se vždy uplatní slabá vazba prostřednictvím van der Waalsových sil. Jestliže povrchy nesou elektrický náboj opačného znaménka, potom je vazba zpevněna elektrostatickou přitažlivou silou. V případě jisté drsnosti povrchů je adhezní vazba zprostředkována navíc čistě mechanicky. Tento typ vazby se projeví především při namáhání ve smyku. Uvedené typy vazby patří mezi slabé interakce a u kompozitů nejsou dominantní.

Významnější typ adhezní vazby vzniká na rozhraní dvou polymerních materiálů, kdy může dojít k vzájemné difúzi (interdifúze) volných konců molekulárních řetězců a vytvoření spletců, které vedou k podstatnému zpevnění vazby. Tohoto typu je využíváno u kompozitů s termoplastickou matricí, kde vyztužující vlákna jsou povrchově upravena pomocí vazebných činidel. Obecně k vzájemné difúzi může dojít i u nepolymerních materiálů. Nejpevnějším typem adhezní vazby je chemická vazba (kovalentní, iontová). Když dojde k chemické reakci na rozhraní mezi dvěma materiály, dojde k provázání obou materiálů prostřednictvím chemické vazby. [33] Jednotlivé adhezní vazby jsou znázorněny na obr. 41.



Obrázek 41: Typy adhezní vazby: (a) elektrostatické přitahování, (b) mechanická vazba, (c) vzájemná difúze, (d) chemická vazba. [33]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této diplomové práce se zabývá:

- popisem použitých tkanin
- popisem použitých polymerních pojiv a chemikálií
- aplikací plazmatické úpravy a popisem použitého bariérového výboje (UPR100W)
- měřením úhlu smáčení polyesterové pryskyřice na vláknech a tkaninách
- popisem přípravy kompozitních struktur a zjišťování hloubky průniku pojiva do vlákenné vrstvy na rastrovacím elektronovém mikroskopu Vega
- měřením adhezních vlastností pojiva k vláknům na přístroji LabTest 2.010
- zjišťováním chemických změn ve strukturách plazmovaných tkanin na spektrofotometru Spectrum One (Perkin Elmer)

3.1 Charakteristika použitých materiálů

V celé experimentální části byly použity čtyři různé typy tkanin, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1: Parametry použitých tkanin

Tkanina	Složení tkaniny	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Dostava osnovy [nití/1cm]	Dostava útku [nití/1cm]	Vazba
Skelná	100 % skleněných vláken	163	13	13	plátnová
Uhlíková	100 % uhlíkových vláken	160	4	4	plátnová
Kevlarová	100 % kevlarových vláken	115	13	13	plátnová
Polyesterová	100 % polyesterových vláken	220	60	20	atlasová

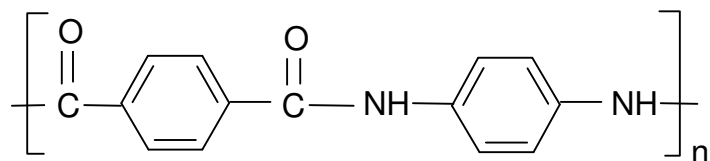
3.1.1 Vlastnosti použitých vláken

Skleněná vlákna – většinou se vyrábějí z E-skla. Strukturně tvoří SiO_2 síť křemíkových atomů obklopených kyslíkovými atomy, které sdílejí. Tato zřetěžená struktura je isotropní. Základní výhodou křemíkových skel je velmi nízká měrná hmotnost, poměrně vysoká pevnost a nízký modul pružnosti. Další výhodou skleněných vláken je, že odolávají ohni a řadě chemikálií. Bod měknutí se pohybuje kolem $700\text{ }^\circ\text{C}$ a maximální teplota pro dlouhodobé použití je $450\text{ }^\circ\text{C}$. Přítomnost vlhkosti ve vláknech však silně snižuje jejich pevnost. K adsorpci vlhkosti dochází zejména u čerstvě zvlákněných skel. Jejich další nevýhodou je nízká odolnost vůči statickému dlouhodobému namáhání (statická únava), dále jsou poměrně křehká a mají relativně nízký modul pružnosti. Skleněná vlákna se používají především jako zesílení do kompozit, izolační materiály, filtrační textilie, nehořlavé dekorační a bytové textilie. [7]

Uhlíková vlákna – je to souhrnný název pro vlákna obsahující uhlík v různých modifikacích. Obecně se uhlíková vlákna vyrábějí řízenou pyrolýzou vhodných prekurzorů, mezi které patří viskózní vlákna, polyakrylonitrilová vlákna a vlákna na bázi smol z dehtu jako zbytků krabování ropy. [7] Výhodou uhlíkových vláken je nejen velká pevnost, vysoký modul, malá objemová hmotnost a vysoká chemická odolnost, ale i neměnnost vlastností až do vysokých teplot (přes $2000\text{ }^\circ\text{C}$ ve vakuu). Vedou také dobře elektrický proud, takže v řadě aplikací nahrazují kovové vodiče. Uhlíková vlákna však snadno oxidují při teplotách nad $500\text{ }^\circ\text{C}$, proto je nezbytná jejich dokonalá ochrana proti korozi vzduchem a oxidujícími látkami v atmosféře. Další nevýhodou uhlíkových vláken je jejich relativní křehkost a vysoká cena oproti skleněným a kevlarovým vláknům. Řadí se, ale mezi nejperspektivnější materiály pro výztuže kompozitů. [27]

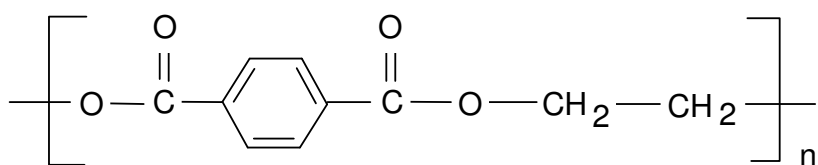
Kevlarová vlákna – patří do skupiny para-aromatických polyamidů (P-aramidy). Přesné chemické složení je polypara-phenyleneterephthalamide. Aramidy se standardně připravují polykondenzační reakcí aromatických diaminů a dikyselin se skupinami COCl . Kevlarová vlákna se vyznačují především vysokou pevností a modulem. [7] Mají nejlepší rázovou houževnatost, nejnižší hustotu, velmi dobré pevnostní parametry a tlumí vibrace. Jsou odolné vůči plameni, vyznačují se samozhášivostí a netaví se. Vlákna jsou chemicky odolná a mají lepší dielektrické vlastnosti než vlákna skleněná. Nejčastěji se používají na výrobu ohnivzdorného oblečení, ochranného oblečení,

ochranných přileb, neprůstřelných vest, bot proti nášlapným minám, optických a telekomunikačních kabelů, různých druhů sportovního vybavení a řada dalšího. [26]



Obrázek 42: Struktura Kevlaru

Polyesterová vlákna – patří jim první místo mezi syntetickými vlákny. Jedná se o kondenzační produkt s esterovou vazbou v hlavním řetězci. Nejdůležitější a nevýznamnější polyester je polyetylentereftalát viz obr. 43 (zkráceně PET), z kterého jsou vyráběny kromě chemických vláken také plastové láhve. Nemodifikovaná PET vlákna vznikají polykondenzací kyseliny tereftalové a etylenglykolu. Polyesterová vlákna mají dobré mechanické vlastnosti, dobrou termickou odolnost (do 200 °C), lépe odolávají slunci než polyamidová vlákna a jsou odolná vůči oděru. Další výhodou je jejich termoplasticita, snadná údržba a rychlé schnutí. Mezi nevýhody polyesterových vláken patří vysoká žmolkovatost, vysoká měrná hmotnost, nabíjení elektrostatickou elektřinou a nízká navlhavost. Používá se především jako směšová komponenta s bavlnou, vlnou, lnem. [41]



Obrázek 43: Struktura polyetylentereftalátu

3.2 Charakteristika použitých polymerních pojiv a chemikálií

3.2.1 Použitá polymerní pojiva

V experimentální části byla použita dvě polymerní pojiva. První polymerní pojivo patří do skupiny reaktoplastů (termosety) a jednalo se o polyesterovou pryskyřici LAMIT 109. Druhým polymerním pojivem byla polyetylenová fólie, která patří do skupiny termoplastů. Zvolena byla polyetylenová fólie s označením PE-LD. Jedná se o nízkohustotní polyetylen.

V technologii vláknových kompozitních materiálů se v současné době používají jako matrice převážně reaktoplasty, jelikož se většinou vyskytují v tekutém stavu a

dobře smáčejí vláknennou výztuž. V menší míře jsou však aplikovány i matrice termoplastické poskytující některé výhody. Převážně se termoplasty používají při vysokých nárocích na chemickou odolnost nebo houževnatost. Největší překážkou většího rozšíření termoplastů jako matric je v současné době především velká viskozita jejich taveniny při zpracování. Viskozita většiny nepolárních termoplastů je o dva až čtyři řády vyšší než u běžných reaktoplastů. To vede ke vzniku defektů (bubliny, nesmočené pramence vláken, problematické smáčení tkanin atd.) při smáčení výztuže a tím ke vzniku kompozitů s nedostatečnými užitnými vlastnostmi. [34]

LAMIT 109 - jedná se o univerzální typ polyesterové pryskyřice (roztok nenasyčené polyesterové pryskyřice ve styrenu) pro laminování. Odstín pryskyřice je čirý s modrošedým nádechem. Používá se k opravám laminovaných předmětů (lodí, bazénů atd.), ale také k výrobě laminátů kontaktních technologií, navíjením a injekčním laminováním. Výhodou je, že rychle tvrdne - po cca 4 hodinách je na 90% tuhosti. Nevýhodou je poměrně velká smrštivost a malá odolnost proti vysokým teplotám. [45]

Tabulka 2: Obecné vlastnosti LAMITU 109 [45]

Vlastnosti	Hodnoty
Hustota při 20°C [g/ml]	1,14
Obsah organických rozpouštědel [%]	38
Netěkavý podíl [%]	62
Třída hořlavosti	3 (hořlavá kapalina)
Tepelná odolnost [°C]	max. 70
Doba zasychání [hod.]	max. 24

PE-LD - nízkohustotní polyetylen běžně označovaný jako polyetylen. Fólie vyráběné z LDPE jsou standardně průhledné. Při vystavení vyšším teplotám dochází k výraznému snížení fyzikálních vlastností a snížení únosnosti.

Tabulka 3: Naměřené vlastnosti PE-LD

Vlastnosti	Hodnoty
Tloušťka [mm]	0,0017
Teplota zesklňování [°C]	49,737
Teplota tání [°C]	110,653
Teplota krystalizace [°C]	94,953

Uvedené teploty tepelných přechodů byly zjištěny metodou DSC (diferenční skenovací kalorimetrie). Při této metodě se vzorek podrobuje lineárnímu ohřevu a plynule se měří rychlost tepelného toku ve vzorku, která je úměrná okamžitému měrnému teplu.

Program, kterým se vzorek polyetylenové fólie analyzoval, byl následující:

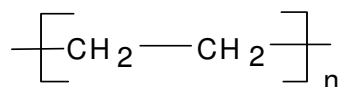
1. začátek měření – udržení teploty 25°C 1min.
2. zahřívání z 25°C na 225 °C rychlostí 15 °C/min
3. ochlazování z 225°C na 25°C rychlostí 15 °C/min

Křivka DSC polyetylenové fólie PE-LD, z které byly odečteny jednotlivé teploty, je znázorněna v příloze č. 1.

3.2.1.1 Všeobecný popis použitých pojmů

Polyesterová pryskyřice (UP) - polyester je nejvíce používanou matricí, dodává kompozitu všeobecně dobré vlastnosti. Nenasycený polyester se může dělit na tři hlavní skupiny: ortoftalový, izoftalový a tereftalový polyester. V tomto pořadí obecně stoupají jejich mechanické vlastnosti, teplotní a chemická odolnost. Ve vztahu k ortoftalovému polyesteru má izoftalový polyester vyšší odolnost proti rázu, je více flexibilní a i jeho odolnost vůči teplotě a korozi (degradaci) je vyšší. Celkově mají polyesterové pryskyřice dobré mechanické, elektrické a chemické vlastnosti. Polyestery jsou vhodné do slabě alkalického prostředí a vynikající do slabě kyselého prostředí. [34]

Polyetylen (PE) – jedná se o termoplast, který vzniká polymerací ethenu. Je odolný vůči kyselinám i zásadám, použitelný do teploty kolem 80°C. Vyrábí se z něj smrštitelné fólie, roury, ozubená kola, ložiska, textilní vlákna, nejrůznější hračky, sáčky (mikroten) a elektrotechnická izolace. V současné době patří mezi nejvíce používanými polymery na světě. [46]



Obrázek 44: Struktura polyetylenu

3.2.2 Použitá chemikálie

Použité tkanin byly před provedením experimentu smočeny v dichlormethanu. Účelem smočení bylo odstranění nečistot ze vzorků tkanin.

Dichlormethan (CH_2Cl_2) - je to bezbarvá, velmi těkavá, nehořlavá kapalina s nasládlým zápachem. Je široce požíván jako výborné rozpouštědlo.

3.3 Aplikace plazmatické úpravy a popis plazmového zařízení

Vzorky skelné, uhlíkové, kevlarové a polyesterové tkaniny zbavené nečistot byly plazmovány bariérovým výbojem (plazmový reaktor UPR100W) viz obr. 45, 46. Tkaniny byly uvedeným zařízením povrchově opracovány jednostranně, jako pracovní plyn byl použit vzduch. Doby opracování se pohybovaly v intervalech: 0, 20, 40, 60 s při výkonu 95 W.

Univerzální plazmový reaktor UPR100W

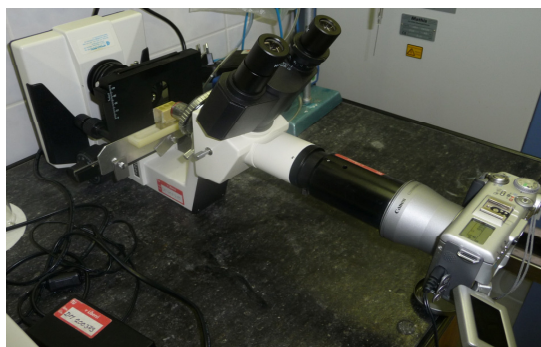
Systém je složený z generátoru a komory, kde probíhá výboj. Generátor je navržen pro maximální výstupní výkon 100 W. Účinnost je přibližně 75 %. Reaktor se může používat jak v kyslíkové tak i v dusíkové atmosféře, minimální tlak pro použití je atmosférický tlak (101 325 Pa). Nerovnovážné plazma povrchového výboje je buzeno stejnosměrným napětím. Celé zařízení je možno vyčerpat a následně naplnit definovanou směsí plynů. Reaktor je konstruován jen pro laboratorní použití. Maximální rozměry opracovávaného vzorku jsou 10 x 10 cm. Současná konfigurace neumožňuje posuv vzorků a proto vlastní kontakt s plazmatem se děje jen v úzkých prouzcích, v nichž hoří výboj. Vlastní doba plazmatického opracování může být měněna v rozsahu od několika sekund až po desítky minut, zpravidla však stačí doba okolo jedné minuty. Díky malým rozměrům je zařízení přenosné. [42]



Obrázek 45, 46: Plazmový reaktor UPS100W

3.4 Měření úhlu smáčení na vláknech a na tkaninách

Všechny vlákna a tkaniny upravené i neupravené plazmatem byly podrobeny měření úhlu smáčení polyesterovou pryskyřicí. Aparatura byla sestavena z fotoaparátu a mikroskopu viz obr. 47. Na vlákna byl nanesen film polyesterové pryskyřice, který se začal rozpadat na malé kapkovité útvary. Následně byly tyto vzniklé kapky foceny. Úhly smáčení na tkaninách byly měřeny metodou přisedlé kapky. Na ně byla nanesena kapka polyesterové pryskyřice mikropipetou o definovaném objemu 10 μ l a také následně focena. Úhel smáčení byl vyhodnocován z fotografie kapky pomocí programu ImageJ. Výjimkou byla polyesterová tkanina, kde se kapka pryskyřice rychle vsakovala, a proto byla hodnocena doba smáčení kapky. Z naměřených hodnot úhlu smáčení pro jednotlivá vlákna a tkaniny byl vypočítán aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient, viz tabulky v příloze č. 2. Výsledné hodnoty úhlu smáčení jsou vyneseny v následujících grafech v kap. 4.1.



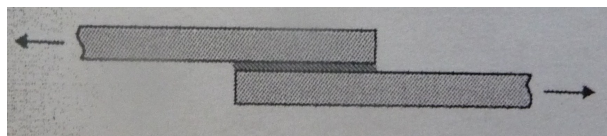
Obrázek 47: Aparatura při měření úhlu smáčení

3.5 Příprava kompozitních struktur pro zjišťování hloubky průniku pojiva do vláken

Pro zjišťování hloubky průniku pojiva na rastrovacím elektronovém mikroskopu VEGA byly připraveny dvě varianty kompozitních struktur.

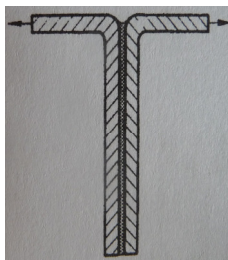
Při přípravě první varianty kompozitní struktury byly použity vzorky uvedených tkanin neupravených a upravených plazmatem o rozměrech 2 x 8 cm. Spojení bylo provedeno polyesterovou pryskyřicí LAMIT 109. K potřebnému množství polyesteru byly přidány za stálého míchání 2 % iniciátoru, který slouží k vytvrzení pryskyřice (tj. polyester 100 hmotnostních dílů : iniciátor 2 hmotnostní díly). Připraveno bylo vždy jen takové množství směsi, které se stačilo zpracovat do 20 minut, jelikož směs začínala

postupně tuhnout. Na místo pojení o rozměrech 2 x 2 cm bylo rovnoměrně nanášeno množství 200 μ l směsi. Tvar spoje je znázorněn na obr. 48. Vytvrzení probíhalo nejdříve 20 minut na vzduchu bez zatížení, dále při zatížení 1000 g po dobu 60 minut po celé ploše spoje. V poslední fázi se vzorky nechaly na vzduchu 24 hodin dotvrdit.



Obrázek 48: Tvar spoje pro adhezní pojení [28]

Druhý typ kompozitní struktury byl též připraven z neupravených i upravených tkanin plazmatem o rozměrech 2 x 8 cm. Mezi dva proužky stejných tkanin byla zalisována polyetylenová fólie PE-LD na přístroji M247A Scorch Tester viz obr. 50, 51. Zalisování probíhalo po dobu 5 minut při teplotě 130 °C. Zalisované místo mezi stejnými neupravenými a upravenými tkaninami polyetylenovou fólií PE-LD bylo o rozměrech 2 x 2 cm. Tvar spoje je znázorněn na obr. 49.



Obrázek 49: Tvar spoje pro adhezní pojení textilií [30]

Přístroj M247A Scorch Tester

Tento přístroj je vhodný pro určování stálobarevnosti, lisování za horka a pro provádění testů sublimace. Skládá se z elektronického regulátoru teploty, který poskytuje řízené podmínky suchého tepla vrchních a spodních zahřívaných krycích desek. Rozsah teploty se pohybuje mezi 120 – 230 °C. [43]



Obrázek 50, 51: M247A Scorch Tester

Z těchto dvou variant kompozitních struktur byl každý vzorek, jak neupravený tak upravený plazmatem, příčně rozřezán žiletkou a připraven k hodnocení průniku pojiva do vláken. Pořízené jednotlivé snímky příčných řezů na rastrovacím elektronovém mikroskopu VEGA jsou znázorněny v kap. 4.2.

Rastrovací elektronový mikroskop VEGA

Rastrovacím elektronovým mikroskopem lze pozorovat povrch vláken a vnitřní strukturu vláken, defekty a poškození vláken, přízí, nití, plošných textilií. Dále lze analyzovat příčiny různých vad v textiliích (mrtvá vlákna bavlny, zašpinění, oděr, atd.). Rastrovací elektronová mikroskopie umožňuje nedestruktivní analýzu poruch textilních struktur, kdy není nutno strukturu rozebírat na jednotlivé konstrukční elementy (příže, nitě, vlákna).

Rastrovací elektronový mikroskop VEGA (obr. 52) na katedře textilních materiálů je určen k pozorování povrchů při velkém zvětšení s velkou rozlišovací schopností, k následnému zaznamenávání a archivování obrázků ve standardním obrazovém formátu na počítačová záznamová média. Program používá rozlišení 512 x 512 pixelů (obrazových bodů) na zobrazovaném obrazu. Jeho maximální rozlišovací schopnost je 4 nm.

Systém Vega se skládá ze čtyř základních jednotek: fyzikální části, elektroniky, počítače a softwaru. Ve fyzikální části mikroskopu vzniká obraz povrchu vzorku a další signály. Fyzikální část obsahuje optický a detekční systém, komoru s manipulátorem a vakuový systém. Elektronika mikroskopu zajišťuje napájení, ovládání fyzikální části mikroskopu, zesilování a předávání užitečných signálů počítači. Počítač a příslušný softwaru jsou řídicí jednotkou celého mikroskopického systému.

Pro rastrovací elektronovou mikroskopii je charakteristická jednoduchá příprava vzorku, ale složité pracovní zařízení. K dosažení obrazu musí být vzorek zbaven organických nečistot a umístěn ve vakuové komoře, aby dopadající elektronový svazek i odražené nebo vyražené elektrony nebyly rozptylovány srážkami s molekulami vzduchu.



Obrázek 52: Rastrovací elektronový mikroskop VEGA

Preparáty příčných řezů byly nejprve nalepeny na pracovní stůl a poté umístěny do zařízení SCD 030, kde proběhlo jejich naprášení tenkou vrstvou (10 – 30 nm) zlata. Takto připravené preparáty byly umístěny do komory mikroskopu. Z rozžhavené katody (wolframového drátu) vyletují elektrony, které jsou zpracovány Wehneltovým válcem a elektromagnetickými čočkami. Paprsek primárních elektronů dopadá na povrch preparátu do hloubky 10 nm (pohybuje se po řádcích preparátu - rastruje) a vyráží sekundární elektrony, které jsou snímány sondou, převáděny v elektronické části na videosignál a zobrazeny na obrazovce monitoru. Získaný obraz lze dále upravovat příkazy až na námi požadovaný obraz. Informace o použitém urychlovacím napětí a zvětšení jsou uvedeny na snímcích z mikroskopu. [44]

3.6 Měření adhezních vlastností pojiva k vláknům

Pro měření adhezních vlastností pojiva k vláknům byly použity uvedené varianty kompozitních struktur, jejichž příprava je popsána v kap. 3.5.

Měření adhezních vlastností pojiva k vláknu bylo prováděno na přístroji LabTest 2.010 (obr. 53) na katedře textilních materiálů TU v Liberci. Připravené vzorky se vkládaly do čelistí trhacího stroje, kde se předem nastavila upínací délka 30 mm. Rychlost průběhu zkoušky (posuv čelisti) byla 50 mm/min. Pro každou sérii měření neupravených a upravených tkanin bylo připraveno pět stejných vzorků. Po proměření vzorků byly výstupní parametry (maximální dosažená síla pevnosti F_{max} [N], práce W [J] a tažnost při maximální dosažené síle A_{max} [mm]) zpracovány počítačovým programem LabTest a spočítány základní statistické parametry (průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient).

Pokusem bylo zjištěno, že první typ kompozitní struktury nebyl vhodný pro měření adhezní vlastnosti pojiva k vláknům tímto způsobem, protože spojený spoj mezi tkaninami byl tak pevný, že nejprve docházelo k přetržení vláken.

Naměřené parametry plazmované a neplazmované kompozitní struktury spojené PE-LD jednotlivých tkanin jsou zaznamenány v tabulkách v příloze č. 5 a z těchto údajů jsou průměrné hodnoty parametrů vyneseny v grafech v kap. 4.3.

Přístroj LabTest 2.010

Přístroj je vybavený dvojicí svíracích čelistí, z nichž jedna čelist je pevná a druhá čelist se pohybuje konstantní rychlostí po celou dobu zkoušky, přitom ve zkušebním systému nedochází k žádnému ohybu. Celá šířka zkušebního vzorku je upnutá v čelistech zkušebního přístroje.

Podstata zkoušky: zkušební vzorek o stanovených rozměrech je protahován konstantní rychlostí až do přetržení. Zaznamenává se maximální síla nutná k přetržení, prodloužení, vykonaná práce, čas zkoušky, modul pružnosti a jiné předem zvolené vlastnosti. Naměřené hodnoty jsou výstupem počítačového programu LabTest, který hodnoty zpracovává dle normy ČSN EN 10002. Parametry, které se během zkoušky zaznamenávají, musí být v programu předem nastaveny. [44]



Obrázek 53: LabTest 2.010

3.7 Zjišťování chemických změn

Vzorky tkanin neupravených a upravených plazmatem po dobu 40 s byly proměřeny na infračerveném spektrometru. Cílem měření bylo zjistit případné chemické

změny na plazmovaných materiálech. Měření bylo prováděno na spektrofotometru Spectrum One (výrobce Perkin Elmer) reflexní technikou pomocí ATR nástavce s vícenásobným odrazem na krystalu ze ZnSe.

Získané hodnoty byly zpracovány v Excelu a následně vyneseny do grafů, které jsou uvedeny v kap. 4.4.

Infračervená spektroskopie

Podstatou infračervené spektroskopie je absorpce infračerveného záření molekulami látek. Infračervené záření má větší vlnovou délku a nižší energii než záření ultrafialové a viditelné. Infračervené záření tedy navazuje na záření viditelné na jedné straně a na záření mikrovlnné na straně druhé. Pokrývá část elektromagnetického spektra v intervalu mezi 0,78 a 1000 μm . V infračervené spektroskopii se běžně místo vlnové délky používá vlnčet. Infračervená oblast se rozděluje na tři části:

- blízká infračervená oblast (0,78 – 2,5 μm tj. 12800 – 4000 cm^{-1})
- střední infračervená oblast (2,5 – 50 μm tj. 4000 – 200 cm^{-1})
- vzdálená infračervená oblast (50 – 1000 μm tj. 200 – 10 cm^{-1})

Pro identifikaci a určování chemické struktury má největší význam střední infračervená oblast (4000-200 cm^{-1}).

Energie infračerveného záření již nestačí na změny elektronových stavů, způsobuje pouze změny vibračních a rotačních stavů molekul. Proto infračervená absorpční spektra jsou spektra vibračně rotační.

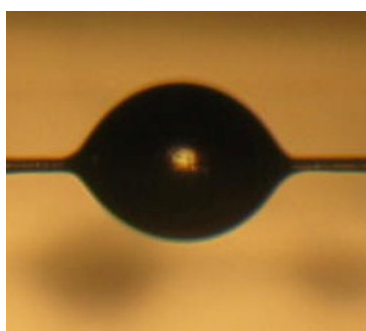
Energetické hladiny rotačních stavů jsou si podstatně blíže než energetické hladiny vibračních stavů. Nastávají-li změny vibračních stavů, jsou doprovázeny i změnami rotačních stavů.

V infračervených spektrech se sleduje závislost transmitance nebo absorpance na vlnočtu absorbovaného záření. Spektrum je pásové. Pásky ve spektru odpovídají různým typům vlnových přechodů. [47]

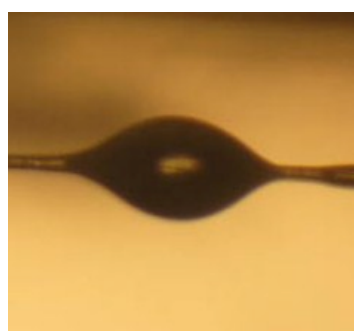
4. VÝSLEDKY A DISKUSE

4.1 Naměřené úhly smáčení na vláknech a na tkaninách

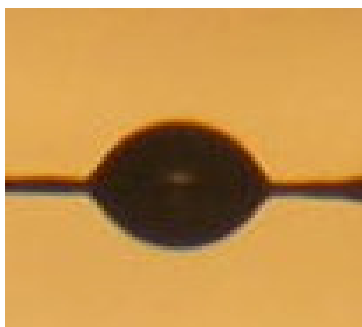
Úhly smáčení jsou užívány jako míra smáčení interakce mezi kapalinou a pevnou látkou. Pracovní postup měření úhlu smáčení na vláknech a tkaninách byl popsán v kap. 3.4. Použitým kapalným pojivem byla polyesterová pryskyřice. Na následujících obrázcích 54 až 61 jsou ukázky kapek na jednotlivých vláknech. Z obrázků je patrný rozdíl v úhlech smáčení na neupravených vláknech a vláknech upravených plazmatem po dobu 40 s.



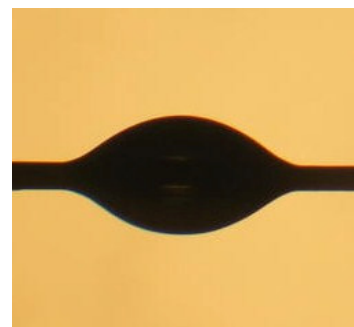
Obrázek 54: Kapka na neplazmovaném skelném vláknu



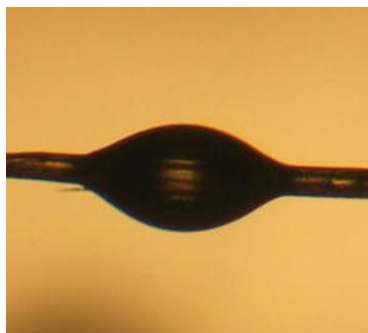
Obrázek 55: Kapka na skelném vláknu plazmovaném 40 s



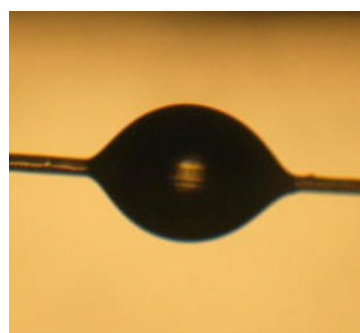
Obrázek 56: Kapka na neplazmovaném uhlíkovém vláknu



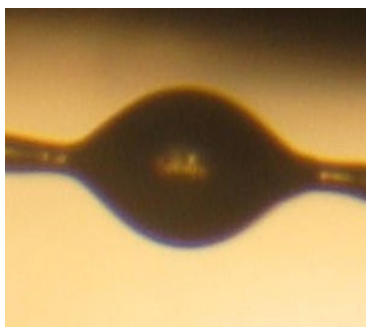
Obrázek 57: Kapka na uhlíkovém vláknu plazmovaném 40 s



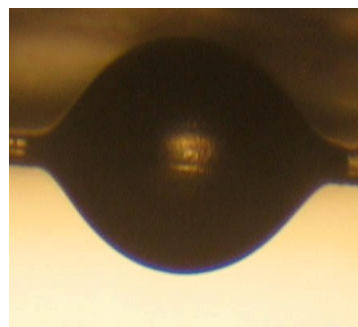
Obrázek 58: Kapka na neplazmovaném kevlarovém vláknu



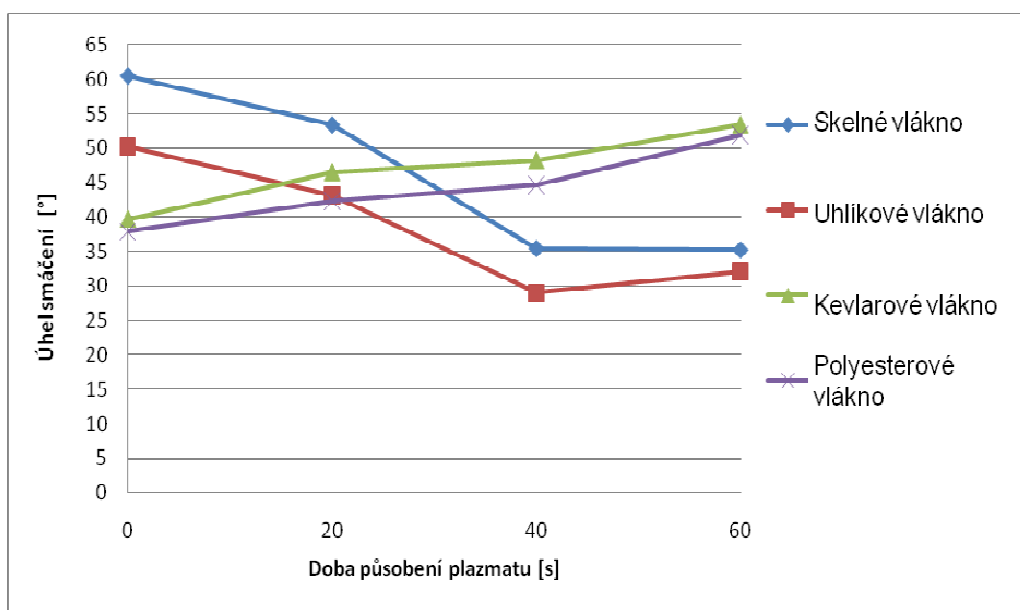
Obrázek 59: Kapka na kevlarovém vláknu plazmovaném 40 s



Obrázek 60: Kapka na neplazmovaném polyesterovém vláknu



Obrázek 61: Kapka na polyesterovém vláknu plazmovaném 40 s



Graf 1: Závislost úhlu smáčení polyesterové pryskyřice na době zpracování plazmatem u skelných, uhlíkových, kevlarových a polyesterových vláken

Na grafu 1 jsou znázorněny úhly smáčení v závislosti na délce expozice plazmatem. Jak je vidět z grafu, došlo plazmatickou úpravou u skelných a uhlíkových vláken ke zvýšení smáčivosti, která se projevuje snížením úhlu smáčení po úpravě. Na upravených skelných a uhlíkových vláknech plazmatem docházelo pravděpodobně ke zvýšení polarit, která je příčinou vzniku tzv. povrchové energie. Tato energie se vyjadřuje veličinou povrchové napětí. Čím vyšší je hodnota povrchového napětí, tím je pevný povrch nebo kapalina polárnější. Je-li povrchové napětí kapaliny nižší, než povrchové napětí substrátu, dochází k většímu smáčení. Pravděpodobně se tedy projevuje vliv mechanické adheze, která způsobí zdrsnění povrchu po plazmatickém působení a tím dojde k zlepšení smáčení pryskyřicí.

Dále je z grafu zřejmé, že u plazmovaných kevlarových a polyesterových vláken docházelo k nepatrnému zvýšení úhlu smáčení, neboť je možné, že plazmatickou

expozicí dochází ke vzniku nepolárních nebo málo polárních látek, které se rozpouští ve styrenu (přítomen v nenasyčené polyesterové pryskyřici). Tyto látky mohou zaplnit místa zdrsňeného plazmaticky upraveného povrchu. Následně tedy dochází ke snížení povrchového napětí a tím ke snížení smáčivosti.

Na obrázcích 62 až 67 jsou ukázky kapek na skelné, uhlíkové a kevlarové tkanině. Výjimkou byla polyesterová tkanina, kde se kapka pryskyřice rychle vsakovala, z tohoto důvodu byla hodnocena doba vsáknutí kapky.



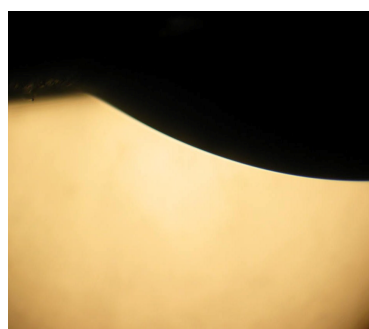
Obrázek 62: Kapka na neplazmované skelné tkanině



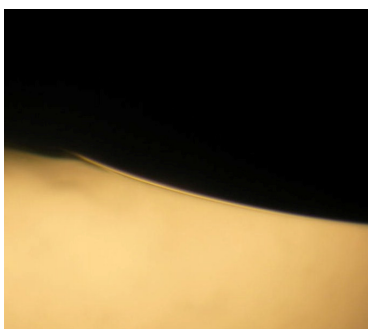
Obrázek 63: Kapka na skelné tkanině plazmované 40 s



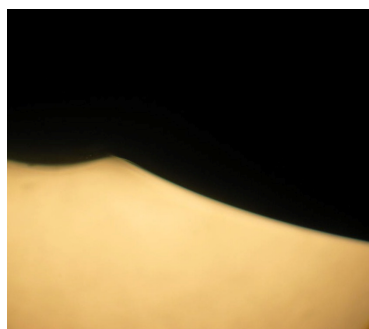
Obrázek 64: Kapka na neplazmované uhlíkové tkanině



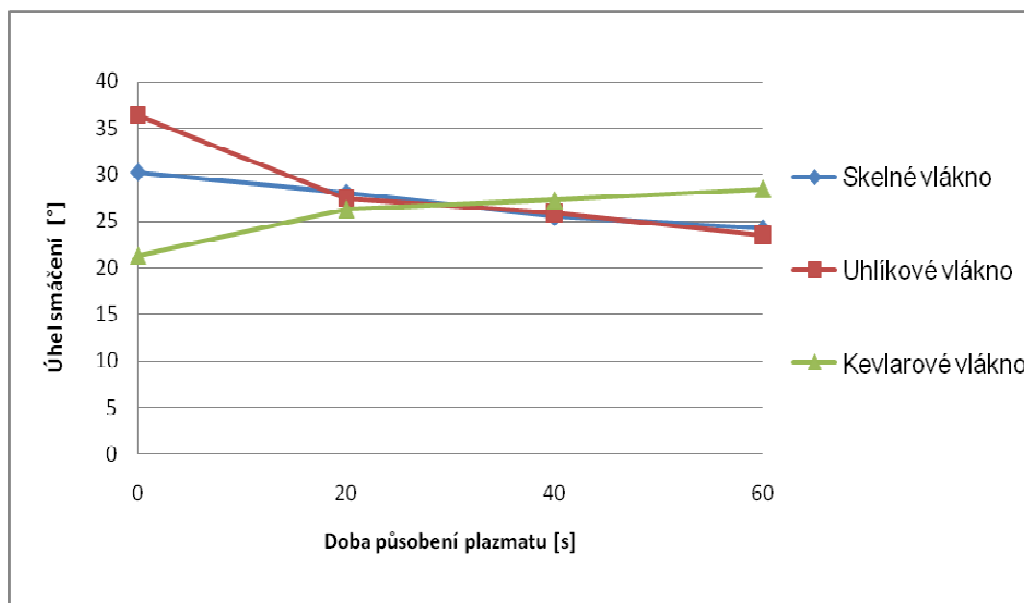
Obrázek 65: Kapka na uhlíkové tkanině plazmované 40 s



Obrázek 66: Kapka na neplazmované kevlarové tkanině



Obrázek 67: Kapka na kevlarové tkanině plazmované 40 s



Graf 2: Závislost úhlu smáčení polyesterové pryskyřice na době zpracování plazmatem u skelných, uhlíkových a kevlarových tkanin

Z grafu 2 je zřejmé, že úhel smáčení u neupravených tkanin je nižší, než úhel u neupravených vláken viz graf 1. Lze říci, že se kapka na povrchu tkanin chová jinak než na vláknech. Což je způsobeno morfologií povrchu. U plazmovaných skelných a uhlíkových tkanin úhly smáčení postupně klesají, jak je tomu i v předchozím grafu u plazmovaných skelných a uhlíkových vláken. Na základě výsledků lze tedy říci, že úhel smáčení polyesterové pryskyřice u skelných a uhlíkových vláken a tkanin klesá s dobou působení plazmatu. Působením plazmatu dochází tedy k zvýšení polaritu povrchu a tím k lepšímu smáčení polyesterové pryskyřice.

Oproti tomu u tkaniny kevlaru úhel smáčení s dobou působení plazmatu nepatrně stoupá. A podobně u polyesterové tkaniny, kde se měřila doba vsáknutí kapky, tato doba mírně stoupla (viz tab. 8, 9 v příloze č. 2). Vznik inertnosti vůči polyesterové pryskyřici může být způsoben vznikem nízkomolekulárních látek rozpuštěných styrenem, jak již bylo popsáno u smáčení vláken. Dále je však možné, že tyto nízkomolekulární látky reagovaly s nečistotami, které nebyly odstraněny při čištění v dichlormethanu, čímž mohlo dojít ke změně povrchového napětí.

4.2 Průnik pojiva do vláken

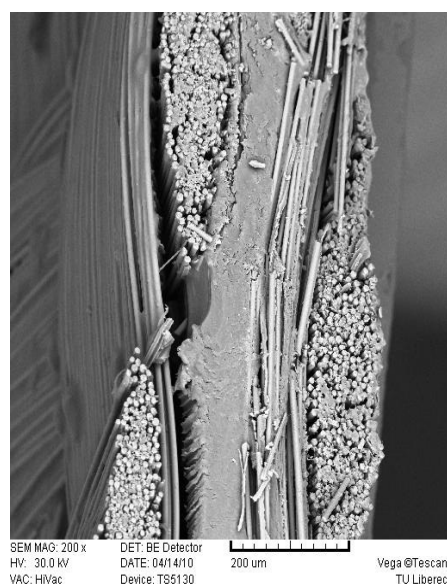
Pro zjišťování hloubky průniku pojiva na rastrovacím elektronovém mikroskopu VEGA byly připraveny dvě varianty kompozitních struktur, které byly popsány v kap. 3.5. Na následujících obrázcích jsou snímky příčných řezů neupravené a upravené skelné kompozitní struktury pojené polyesterovou pryskyřicí.



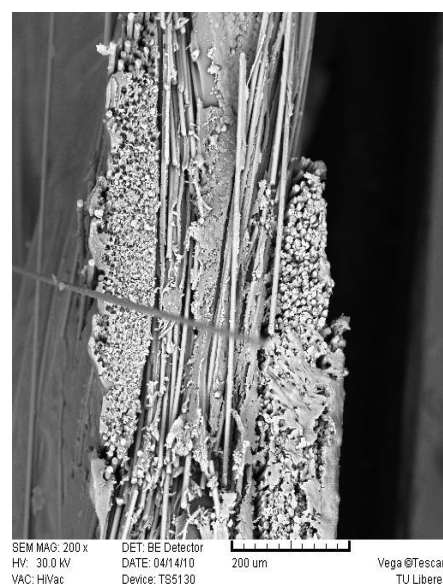
Obrázek 68: Příčný řez neupravené skelné kompozitní struktury



Obrázek 69: Příčný řez skelné kompozitní struktury upravené plazmatem 20 s



Obrázek 70: Příčný řez skelné kompozitní struktury upravené plazmatem 40 s



Obrázek 71: Příčný řez skelné kompozitní struktury upravené plazmatem 60 s

Na obrázcích jsou vidět jednotlivá vlákna tkanin a mezi nimi nanesená polyesterová pryskyřice. Pryskyřice pronikla do vlákně výztuže a umožnila spojení tkanin. S dobou působení plazmatu nedošlo na pohled k výrazně viditelným změnám. Ostatní snímky uhlíkových, kevlarových a polyesterových kompozitních struktur jsou uvedeny v příloze č. 3.

Dále jsou zobrazeny snímky příčných řezů skelné kompozitní struktury a kevlarové kompozitní struktury pojené polyetylenovou fólií.



Obrázek 72: Příčný řez neupravené skelné kompozitní struktury



Obrázek 73: Příčný řez skelné kompozitní struktury upravené plazmatem 20 s



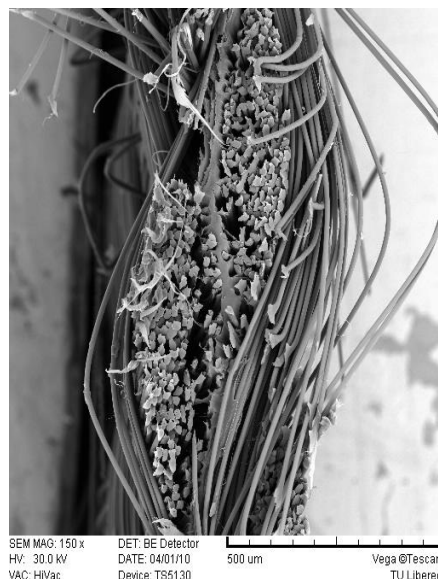
Obrázek 74: Příčný řez skelné kompozitní struktury upravené plazmatem 40 s



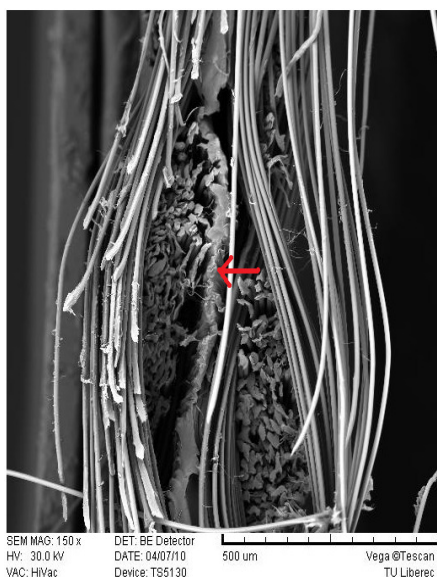
Obrázek 75: Příčný řez skelné kompozitní struktury upravené plazmatem 60 s



Obrázek 76: Příčný řez neupravené kevlarové kompozitní struktury



Obrázek 77: Příčný řez kevlarové kompozitní struktury upravené plazmatem 20 s



Obrázek 78: Příčný řez kevlarové kompozitní struktury upravené plazmatem 40 s



Obrázek 79: Příčný řez kevlarové kompozitní struktury upravené plazmatem 60 s

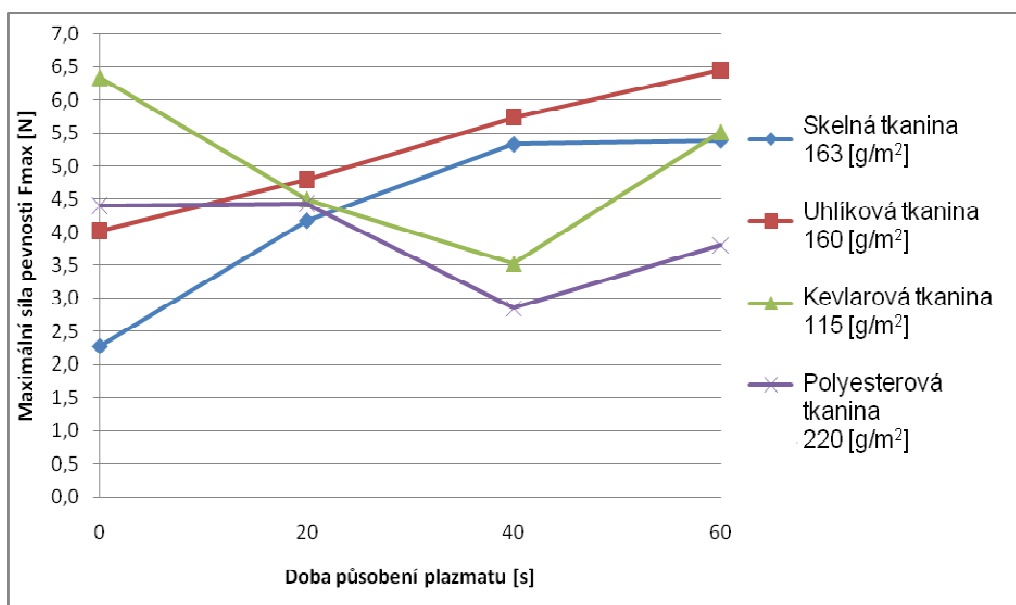
Z obrázků příčných řezů skelných kompozitních tkanin je již vliv doby působení plazmatu dobře patrný. Fólie se lépe zatavila do povrchů vláken, protože se s působením plazmatu zvýšila adheze mezi vlákennou výztuží a maticí. Důsledkem je vznik pevnějšího spoje. K obdobnému efektu docházelo u uhlíkových kompozitních struktur pojené polyetylenovou fólií, jejichž snímky jsou uvedeny v příloze č. 4.

Fólie u kevlarových kompozitních struktur s dobou působení plazmatu se méně zatahuje do vláken. Po působení plazmatu při 60 s se naopak zvyšuje přilnavost

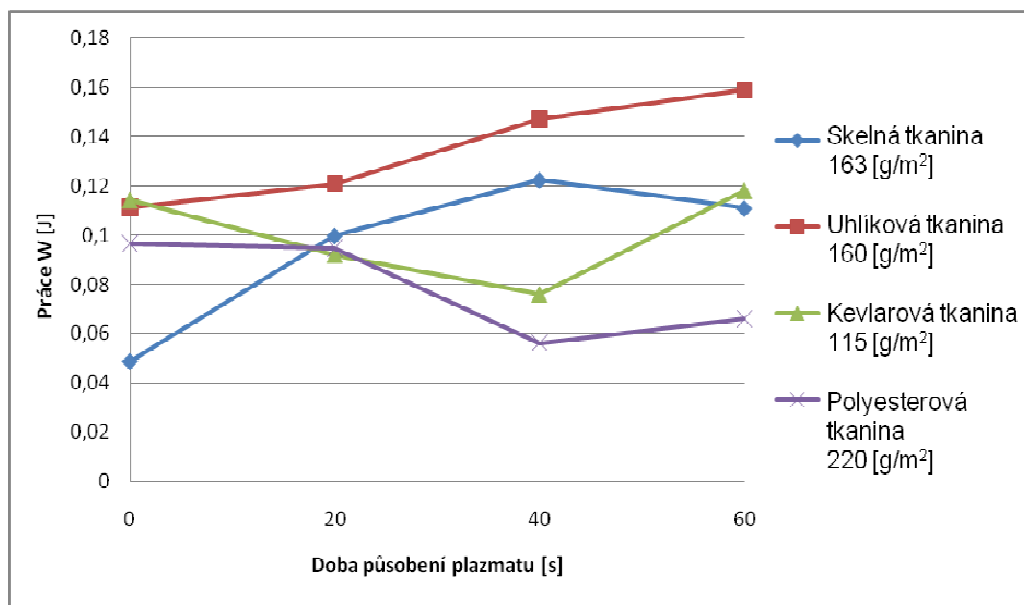
polyetylenové fólie mezi vrstvami tkanin. Což je stejné i u snímcích příčných řezů polyesterových kompozitních struktur viz příloha č. 4.

4.3 Naměřené výsledky na přístroji LabTest 2.010

Pracovní postup na přístroji LabTest 2.010 byl popsán v kap. 3.6. Měření bylo prováděno za účelem zjištění pevnosti spoje plazmovaných a neplazmovaných kompozitních struktur jednotlivých tkanin. S tím souvisí změna adheze mezi plazmovanými a neplazmovanými vzorky mezi vlákenou výztuží a matricí. Výstupem programu LabTest pro plazmovanou a neplazmovanou kompozitní strukturu jednotlivých tkanin byly hodnoty charakterizující maximální sílu pevnosti F_{max} [N], práci W [J] a tažnost při maximální dosažené síle A_{max} [mm]. Závislost těchto parametrů na době působení plazmatu představují grafy 3 až 5. Graf 5 je uveden v příloze č. 6.



Graf 3: Závislost maximální dosažené síly pevnosti na době působení plazmatu u skelných, uhlíkových, kevlarových a polyesterových kompozitních struktur pojených polyetylenovou fólií



Graf 4: Závislost vykonané práce na době působení plazmatu u skelných, uhlíkových, kevlarových a polyesterových kompozitních struktur pojených polyetylenovou fólií

Na základě výsledků získaných měření na přístroji LabTest 2.010 je z grafu 3 patrné, že s dobou působení plazmatu rostla maximální síla pevnosti F_{max} [N] u uhlíkových a skelných kompozitních struktur, tedy vznikala pevnější spoj. Oproti tomu u kevlarových a polyesterových kompozitních struktur docházelo k snížení maximální síly pevnosti při době působení plazmatem 40 s. U těchto struktur následně docházelo k značnému nárůstu F_{max} [N] při době působení plazmatem 60 s.

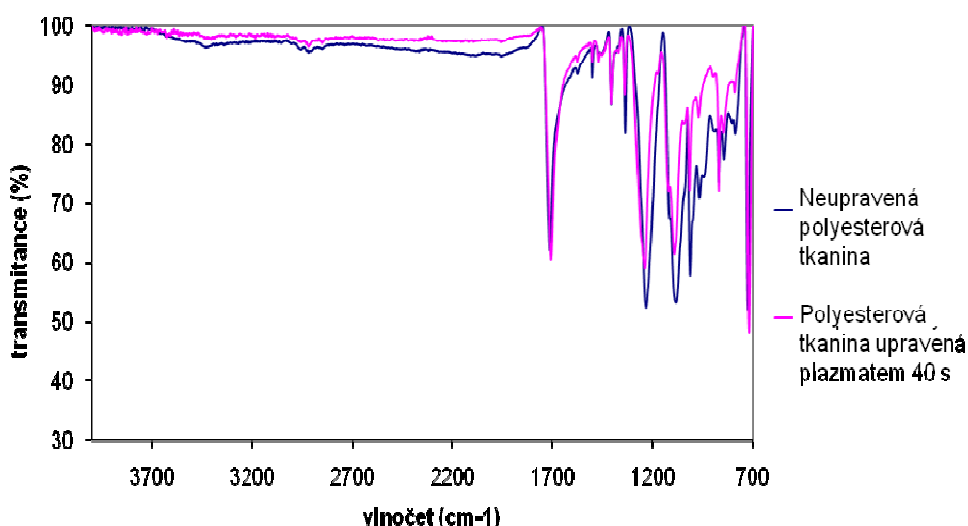
S tím souvisí i výsledky vynesené v grafu č. 4, které znázorňují závislost vykonané práce na době působení plazmatu. Tedy u uhlíkových a skelných kompozitních struktur musela být z důvodu pevnějšího spoje, který vznikala s dobou působení plazmatu, vynaložena větší práce. Anomálie vznikající u kevlarových a polyesterových kompozitních struktur se projevila i v tomto případě.

Lze tedy usuzovat, že u uhlíkových kompozitních struktur se zvyšuje adheze mezi vlákny a maticí. Použitá úprava vzduchovým plazmatem vytváří na povrchu vláken funkční skupiny, které umožňují vázat pojiva silnějšími chemickými vazbami. Tím se zvýší vazba vlákno - polymerní matrice. Obecně se předpokládá především přítomnost hydroxylových ($-OH$), aldehydických ($-CH=O$) a karboxylových ($-C(=O)-OH$) skupin. Zároveň, jak u uhlíkových tak i skelných kompozitních struktur, dochází k odleptávání povrchových vrstev a tím k zdrsňování povrchů. Zvětší se povrchová plocha, která způsobí větší tření mezi vláknem a maticí a tím se tedy zlepší zakotvení matrice do vláken.

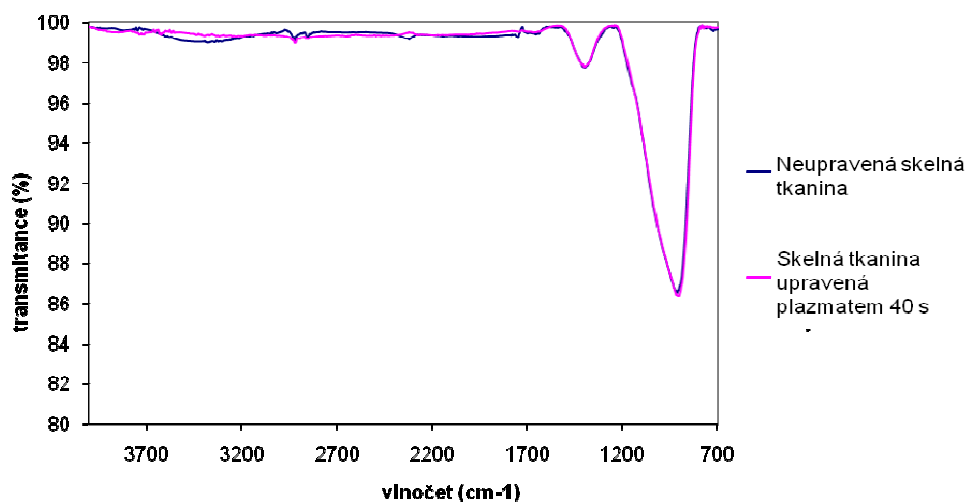
U kevlarových a polyesterových kompozitních struktur dochází ve 40 s k prudkému poklesu pevnosti, pravděpodobně zapříčiněné vznikem vrstvičky nízkomolekulárních látek, která zabránila natavení fólie do povrchu vláken. Po 60 s došlo k opětovnému nárůstu pevnosti způsobené možným rozrušením nízkomolekulárních látek, které nebránily přístupu polyetylenové fólie na vyleptaná místa plazmatem. Tento efekt dokazují i výše uvedené obrázky (76 až 79).

4.4 Infračervená spektroskopie

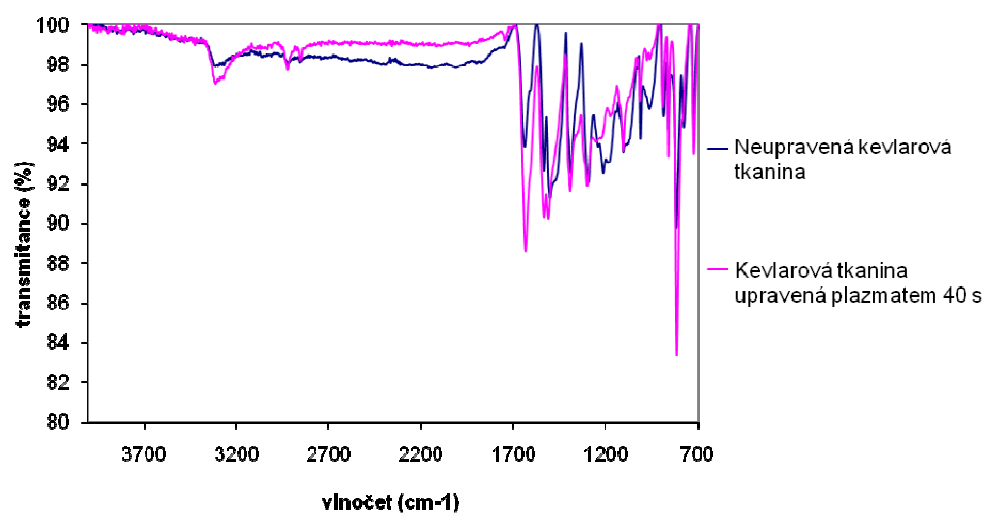
Vzorky neplazmovaných i plazmovaných tkanin po dobu 40 s byly proměřeny na spektrofotometru Spectrum One (Perkin Elmer). Cílem měření bylo zjistit případné chemické změny na plazmovaných materiálech. V grafech 6 až 9 jsou uvedeny infračervená spektra jednotlivých tkanin.



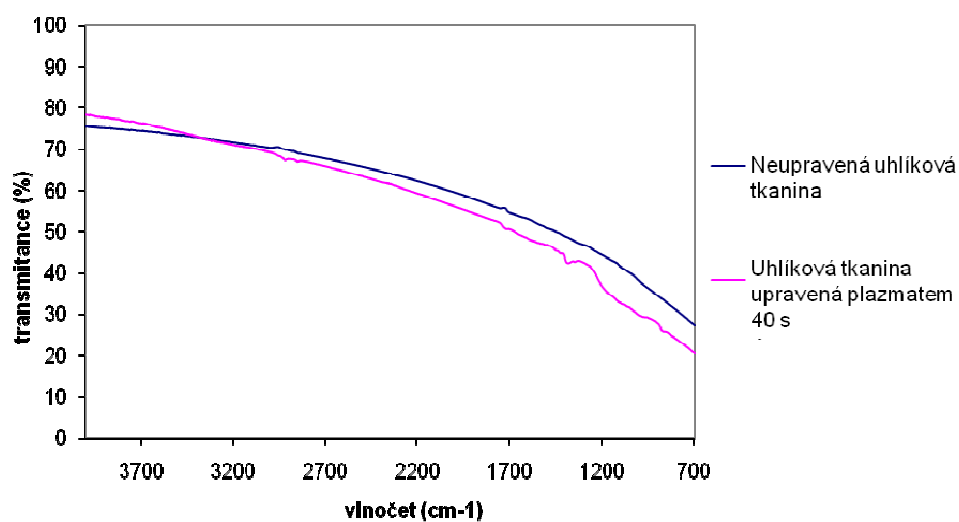
Graf 6: Závislost transmittance na vlnočtu – spektra neplazmované a plazmované polyesterové tkaniny



Graf 7: Závislost transmittance na vlnočtu – spektra neplazmované a plazmované skelné tkaniny



Graf 8: Závislost transmittance na vlnočtu – spektra neplazmované a plazmované kevlarové tkaniny



Graf 9: Závislost transmittance na vlnočtu – spektra neplazmované a plazmované uhlíkové tkaniny

V grafu 6 u polyesterové tkaniny lze pozorovat změny v oblasti skeletálních vibrací. V oblasti 1706 cm^{-1} jsou valenční vibrace vazby $\text{C}=\text{O}$. Nižší vlnočty nelze popsat, protože se jedná o vibrace skeletu a vibrace kombinační. V této oblasti nelze jednotlivé vrcholky přiřadit konkrétním vazbám. Lze usuzovat, že se zřejmě jedná o rozrušení vazeb mezi uhlíky v řetězci (změna délky a rozvětvení).

U skelné tkaniny (viz graf 7) jsou ve spektru pouze vazby Si-O-Si a Si-O-H a po působení plazmatu nejsou vidět žádné změny.

Z grafu 8 vyplývá, že u kevlarové tkaniny docházelo k nepatrným změnám v oblasti 3313 cm^{-1} valenčních vibrací vazeb N-H , v oblasti $2930 - 2830\text{ cm}^{-1}$ valenčních vibrací vazeb C-H a v oblasti 1632 cm^{-1} valenčních vibrací $\text{C}=\text{C}$ nekonjugovaných. Dále byly zjištěny deformační vibrace vazeb C-H v oblasti 1528 a 1500 cm^{-1} . K převážným změnám docházelo ve skeletální oblasti. Platí totéž co pro polyesterovou tkaninu.

Uhlíková vlákna (viz graf 9) v infračervené oblasti silně absorbují v celém rozsahu. Spektra nelze použít.

Ve spektrech nejsou patrné žádné výrazné rozdíly mezi neupravenými a upravenými vzorky plazmatem (40 s). Pokud na povrchu vzorků docházelo k nějakým změnám způsobené úpravou plazmatem, tak jsou pouze ve velmi tenké povrchové vrstvě (řádově nm). Jelikož paprsek při měření infračervené spektroskopie proniká hlouběji do materiálu a tak nezachytí změny povrchové vrstvy.

5. ZÁVĚR

Plazmová technologie se stává čím dál oblíbenější jako technika povrchového upravování textilií. Nabízí nespočet výhod v porovnání s běžnými chemickými postupy. Plazmatická povrchová úprava si nežadá spotřebu vody a chemikálií, což vyúsťuje v hospodárnější a k přírodě šetrnější postup.

Ve spojení s kompozitními materiály je o plazmatické úpravě známo, že zlepšuje mezifázové rozhraní mezi matricí, která působí v materiálu jako pojivo a vláknennou výztuží, která je v materiálu nositelem pevnosti. Podle druhu výztuže a matrice můžeme vyrábět různé kompozity se širokou škálou použití. Složený materiál je navrhován tak, aby bylo možno získat nový materiál s lepšími vlastnostmi, než mají samotné složky.

Cílem této diplomové práce bylo zjistit vliv doby působení plazmatu na skelných, uhlíkových, kevlarových a polyesterových tkaninách. Modifikace povrchů tkanin probíhala plazmovým reaktorem UPF100W (pracovní plyn - vzduch). Na plazmovaných a neplazmovaných materiálech byla testována smáčivost pojiva, hloubka průniku pojiva (rastrovací elektronový mikroskop VEGA) a adhezní vlastnosti pojiva (přístroj LabTest 2.010).

V této práci byla zjištěna odlišnost chování anorganických materiálů, jakými byly sklo a uhlík v porovnání s látkami syntetického původu kevlar a polyesterem. Anorganická vlákna se stoupající dobou plazmatické expozice zvýšily smáčení polyesterovou pryskyřicí na vláknech a tkaninách, dále se zvýšil průnik polyetylenové fólie do vláken a adhezní vlastnosti fólie k vláknům. Naopak u syntetických vláken okolo 40 s plazmatické úpravy dochází ke snížení pevnosti, pravděpodobně způsobené vznikem nízkomolekulárních látek, které při 60 s degradují a tudíž dochází k opětovnému nárůstu pevnosti.

Závěrem lze tedy říci, že plazma je efektivní metodou pro předúpravu kompozitních výztuží z vysokopevných vláken, což bylo v této práci dokázáno u skelných a uhlíkových tkanin vznikem silnějšího spoje mezi matricí a vláknennou výztuží. Pro další zpracování této diplomové práce bych doporučila delší časy vystavení materiálů plazmatu, použití jiného plazmového zařízení s vyšším výkonem, použití např. nízkotlakého plazmatu, použití různých reaktivních plynů během procesu plazmování (např. kyslík, dusík a plyny obsahující halogenové skupiny), dále použití jiných metod pro zjišťování chemického složení na povrchu plazmovaných materiálů

např. metoda XPS. Také v případě použití jiného druhu pryskyřice (např. epoxidová) by se efekt úpravy mohl projevit jinak.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Wikipedie, Fyzika plazmatu, volně ke stažení z http://cs.wikipedia.org/wiki/Fyzika_plazmatu [10.1.2010]
- [2] Lišková M., Plazmochemické reakce, volně ke stažení z http://www.is.muni.cz/th/77987/prif_m/plazmochemie.doc [10.1.2009]
- [3] Těšínský M.: Fyzikální seminář, volně ke stažení z <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2001-2002/Leto02/FSL02sb/sbornik.pdf> [19.1.2010]
- [4] Kulháněk P., Mlhovinový plazmaglosář, volně ke stažení z http://www.aldebaran.cz/~kulhanek/texts/2002_Astropis_gloss.pdf [19.1.2010]
- [5] Libra M., Kluiber Z., Světlo - Plazma je všude kolem nás, volně ke stažení z http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22863 [19.1.2010]
- [6] Shishoo, R.: Plasma technologies for textiles, Woodhead Publishing in textiles, Cambridge – England, 2007
- [7] Militký J.: Technické textilie, Technická univerzita v Liberci, 2002
- [8] Horová Z., Plazma, volně ke stažení z http://fyzweb.cz/materialy/hvizdy/5_plazma.pdf [19.1.2010]
- [9] Rongzhi Li, Lin Ye, Yiu-Wing Mai: Application of plasma technologies in fibre-reinforced polymer composites: a review of recent developments, The University of Sydney, Australia, received 24 April 1996, revised 19 July 1996
- [10] Rossnagel S. M., Cuomo J. J., Westwood W. D.: Handbook of plasma processing technology, Noyes Publications, 1990
- [11] Grycz B.: Čtvrté skupenství hmoty, SNTL, Praha, 1962
- [12] Čech J.: Porovnávací studium vlivů parametrů výboje na vlastnosti plazmatu koplanárního bariérového výboje, DP, Brno 2006, volně ke stažení z http://is.muni.cz/th/63843/prif_m/Cech_J_diplomova_prace_2006.pdf [1.2.2010]
- [13] Co je to plazma?, volně ke stažení z <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics.html> [1.2.2010]
- [14] Havlíček J., Aftanas M.: Plazma (Elementární procesy, Výboje), volně ke stažení z <http://atrey.karlin.mff.cuni.cz/~marble/d/?p=1,p=3> [1.2.2010]
- [15] Pochner K., Neff W., Lebert R., Atmospheric pressure gas discharges for surface treatment, Surface and coating technology, 1995
- [16] Pospíšilová E.: Plazmová modifikace povrchu vláken, DP, TUL Liberec 2004

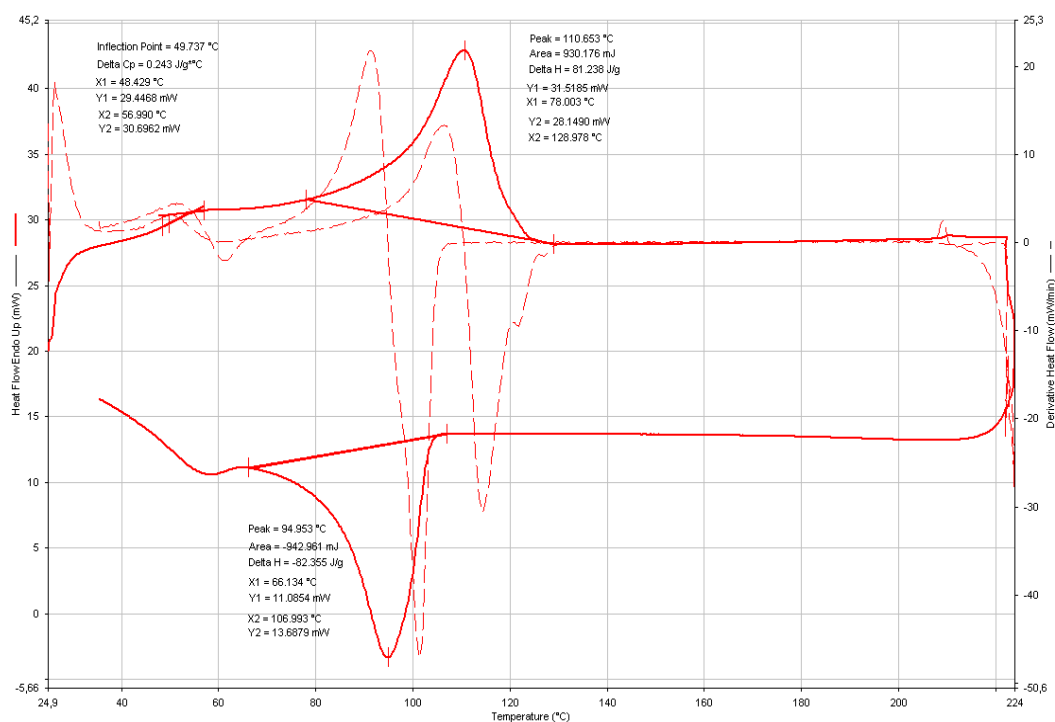
- [17] Vatuša T.: Directions for experiment -The plasma modification, vnitřní zdroj TU Liberec, 2004
- [18] Wiener J.: Trendy textilní chemie, elektronické přednášky, 2009
- [19] Aubrecht L.: Corona discharges on plants and trees, Department of physics, Fakulty of Electrical Engineering, Czech Technical University, 2001
- [20] Černé světlo, volně ke stažení z <http://tf.czu.cz/~libra/black.htm> [8.2.2010]
- [21] Bogaerts A. et. al.: Gas discharge plasma and their applications, 2002
- [22] Ondrášková M., Ráhel J., Zahoranová A, Tiňo R, Černák M: Plasma activation of wood surface by diffuse coplanar surface barrier discharge, Plasma chemistry and plasma processing, (NLD). ISSN 0272-4324. Ročník 28, číslo 2
- [23] Europlasma – Your partner in surface treatment, volně ke stažení z <http://www.europlasma.be/pageview.aspx> [9.2.2010]
- [24] Plazmová technika, volně ke stažení z <http://www.plasma.de/cz/plasmatechnique/plasmatechnique.html> [9.2.2010]
- [25] Zajíčková L.: PECVD a opracování povrchu materiálů v nízkotlakých výbojích, volně ke stažení z <http://vakspol.cz/lsvt05/Zajickova.pdf> [9.2.2010]
- [26] Vejražková I.: Plasty pro stavebnictví a architekturu 7 – Polymerní vláknové kompozity, volně ke stažení z <http://www.imaterialy.cz/clanky/materialy/2967/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-7-polymerni-vlaknove-kompozity/> [15.2.2010]
- [27] BAREŠ, R.A.: Kompozitní materiály, SNTL, Praha, 1988
- [28] Campbell F.C.: Manufacturing Processes for Advance Composites, British Library Cataloguing in Publication Data, 2004
- [29] Agarwal B. D., Broutman L. J.: Analysis and Performance of Fiber Composites, Published simultaneously in Canada, 1980
- [30] Sodomka L.: Struktura, vlastnosti, diagnostika a nové technologie oddělování, spojování a pojení textilií, Technická univerzita v Liberci, 2002
- [31] HAVEL Composites CZ s.r.o., the world of composites, volně ke stažení z <http://www.havel-composites.com> [15.2.2010]
- [32] Kompozitní materiály, volně ke stažení z http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni-materialy.pdf [15.2.2010]
- [33] Povrchové úpravy vláken pro polymerní kompozity, volně ke stažení z <http://www.mmspektrum.com/pdf/c060444.pdf> [15.2.2010]

- [34] Skriptum TUL Liberec, volně ke stažení z <https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-03-16/12-55-59.pdf> [15.2.2010]
- [35] Kulháněk P., Surfování na vlnách – urychlovače budoucnosti?, volně ke stažení z <http://www.observatory.cz/news/detail.php?page=&id=191&pda=> [1.2.2010]
- [36] Způsoby výroby vláknových kompozitu, volně ke stažení z wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/.../skripta_5.doc [22.2.2010]
- [37] Daňourek K.: Kompozitní materiály-druhy a jejich užití, Technická univerzita v Liberci, 2007
- [38] Wiener J.: Smáčení povrchů, elektronická skripta, 2004
- [39] Jirsák O., Kalinová K.: Netkané textilie, Technická univerzita v Liberci, 2003
- [40] Krčmar R.: Teorie netkaných textilií, Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1986
- [41] Militký J.: Textilní vlákna, Technická univerzita v Liberci, 2002
- [42] Universal Plasma Reactor UPR100W, volně ke stažení z <http://pstsyste.ms.wz.cz/upr100w.html> [23.3.2010]
- [43] M247 A Scorch/Sublimation Testers, volně ke stažení z <http://sdlatlas.com/product/182/Scorch--Sublimation-Testers#> [14.4.2010]
- [44] Interní materiály, KTM TU v Liberci 2010
- [45] Bezpečnostní list, volně ke stažení z http://www.kittfort.cz/products/pdf_download/bezp_listy/bl_lamit109_a_souprava.pdf [14.4.2010]
- [46] Polyethylen, volně ke stažení z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyethylen> [14.4.2010]
- [47] Klouda P.: Moderní analytické metody, Nakladatelství Pavel Klouda, Ostrava, 2003
- [48] Chaloupek J.: Smáčení vláknových útvarů, Disertační práce, TUL Liberec 2007
- [49] Mullins B. J., Agranovski I. E, Braddock R. D., Ho Chi M.: Effect of fiber orientation on fiber wetting processes, Griffith University, Australia, received 21 April 2003, accepted 17 July 2003

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1: Křivka DSC (diferenční scanovací kalorimetrie) polyetylenové fólie PE-LD
- Příloha č. 2: Tabulky naměřených úhlů smáčení polyesterovou pryskyřicí na neplazmovaných a plazmovaných vláknech a tkaninách
- Příloha č. 3: Snímky příčných řezů neplazmovaných a plazmovaných kompozitních struktur spojených polyesterovou pryskyřicí LAMIT 109 z rastrovací elektronové mikroskopie (REM) pro jednotlivé tkaniny
- Příloha č. 4: Snímky příčných řezů neplazmovaných a plazmovaných kompozitních struktur spojených polyetylenovou fólií PE-LD z rastrovací elektronové mikroskopie (REM) pro jednotlivé tkaniny
- Příloha č. 5: Tabulky naměřených parametrů přístrojem LabTest 2.010 pro neplazmované a plazmované kompozitní struktury spojené PE-LD jednotlivých tkanin
- Příloha č. 6: Graf závislosti tažnosti při maximální dosažené síle na době působení plazmatu
- Příloha č. 7: Grafy naměřených hodnot na přístroji LabTest 2.010 pro jednotlivé neupravené kompozitní struktury a kompozitní struktury upravené 40 s plazmatem spojené polyetylenovou fólií

Příloha č. 1



Obrázek 80 : Křivka DSC (diferenční scanovací kalorimetrie) polyetylenové fólie PE-LD

Příloha č. 2

Tabulka 4: Přehled naměřených úhlů smáčení polyesterovou pryskyřicí na neplazmovaných vláknech

Měření	Skelné vlákno úhel smáčení [°]	Uhlíkové vlákno úhel smáčení [°]	Kevlarové vlákno úhel smáčení [°]	Polyesterové vlákno úhel smáčení [°]
1	61,9	46,1	36,3	40,7
2	64,2	45,0	41,9	41,8
3	57,3	52,4	30,3	43,3
4	57,7	50,2	39,8	36,4
5	65,0	46,2	36,4	41,0
6	56,7	54,1	35,6	34,6
7	60,4	48,4	48,4	32,4
8	67,2	60,8	39,7	38,6
9	57,9	49,9	48,8	34,0
10	60,7	52,4	38,5	33,2
11	54,1	57,4	30,4	32,4
12	61,8	51,3	44,4	30,4
13	59,7	51,2	40,9	34,6
14	57,7	46,4	45,0	36,9
15	62,1	46,3	34,5	36,7
16	61,0	43,7	45,9	37,7
17	60,5	51,5	33,1	44,7
18	65,0	49,7	32,8	44,6
19	62,2	45,6	47,1	41,3
20	56,3	56,3	45,0	42,4
Průměrná hodnota	60,5	50,2	39,7	37,9
Směrodatná odchylka	3,277	4,385	5,789	4,279
Variační koeficient [%]	5,420	8,728	14,570	11,299

Tabulka 5: Přehled naměřených úhlů smáčení polyesterovou pryskyřicí na vláknech plazmovaných 20 s

Měření	Skelné vlákno úhel smáčení [°]	Uhlíkové vlákno úhel smáčení [°]	Kevlarové vlákno úhel smáčení [°]	Polyesterové vlákno úhel smáčení [°]
1	49,9	40,3	51,0	42,2
2	56,5	46,4	31,0	44,5
3	54,8	41,3	49,0	49,5
4	51,5	47,1	42,8	46,8
5	57,7	43,0	51,9	47,7
6	56,5	46,4	49,9	40,3
7	54,9	37,6	52,0	45,8
8	57,3	50,0	35,9	33,0
9	48,7	43,2	31,5	26,3
10	44,2	46,1	51,7	49,5
11	49,5	33,4	49,2	41,4
12	53,3	48,2	42,6	50,1
13	50,9	46,6	46,5	45,0
14	57,0	43,4	48,4	42,7
15	53,0	42,7	47,7	43,6
16	52,7	45,6	43,8	41,0
17	50,0	34,3	55,9	37,7
18	56,1	37,3	53,1	44,6
19	56,0	46,1	48,7	36,9
20	58,2	45,7	47,8	38,0
Průměrná hodnota	53,4	43,2	46,5	42,3
Směrodatná odchylka	3,637	4,478	6,684	5,756
Variační koeficient [%]	6,808	10,358	14,367	13,601

Tabulka 6: Přehled naměřených úhlů smáčení polyesterovou pryskyřicí na vlákna plazmovaných 40 s

Měření	Skelné vlákno úhel smáčení [°]	Uhlíkové vlákno úhel smáčení [°]	Kevlarové vlákno úhel smáčení [°]	Polyesterové vlákno úhel smáčení [°]
1	43,1	27,5	48,0	38,1
2	45,0	24,9	45,5	41,5
3	34,5	26,0	37,1	44,8
4	33,7	28,3	43,5	34,3
5	34,4	29,0	50,7	38,4
6	31,5	29,8	49,1	54,8
7	25,4	30,5	40,3	49,4
8	31,2	29,4	37,5	43,9
9	36,1	27,0	49,5	52,4
10	36,9	32,9	46,2	44,7
11	35,0	27,1	51,2	41,5
12	33,5	33,0	56,1	38,0
13	35,5	32,8	48,9	47,1
14	30,9	28,8	55,2	48,8
15	26,8	27,1	44,3	43,6
16	45,0	29,5	51,0	41,8
17	42,9	28,6	56,3	49,6
18	37,5	27,4	53,1	47,6
19	38,9	29,5	44,4	47,9
20	31,7	31,0	56,8	45,2
Průměrná hodnota	35,5	29,0	48,2	44,7
Směrodatná odchylka	5,328	2,201	5,758	5,074
Variační koeficient [%]	15,024	7,589	11,936	11,359

Tabulka 7: Přehled naměřených úhlů smáčení polyesterovou pryskyřicí na vlákna plazmovaných 60 s

Měření	Skelné vlákno úhel smáčení [°]	Uhlíkové vlákno úhel smáčení [°]	Kevlarové vlákno úhel smáčení [°]	Polyesterové vlákno úhel smáčení [°]
1	37,9	34,6	52,8	62,9
2	39,6	32,3	53,7	50,8
3	40,3	35,1	55,2	48,9
4	34,9	38,1	45,5	56,7
5	43,9	26,8	53,1	50,7
6	42,2	29,8	54,9	51,0
7	33,5	33,1	55,2	49,7
8	39,3	27,6	61,0	47,0
9	36,5	31,8	57,5	63,4
10	40,7	29,6	57,4	54,8
11	41,8	30,0	53,4	48,7
12	26,8	32,3	37,9	51,3
13	28,2	37,7	55,1	53,1
14	37,2	32,0	56,3	39,6
15	29,0	35,8	59,0	57,1
16	38,0	35,2	55,0	54,5
17	44,1	31,3	43,8	52,7
18	35,6	30,9	48,8	44,1
19	36,0	30,0	53,2	53,6
20	36,7	28,6	58,2	47,6
Průměrná hodnota	35,3	32,1	53,4	51,9
Směrodatná odchylka	4,874	3,088	5,405	5,508
Variační koeficient [%]	13,820	9,615	10,130	10,610

Tabulka 8: Přehled naměřených úhlů smáčení polyesterovou pryskyřicí na neplazmovaných tkaninách a časů vsakování kapky polyesterové pryskyřice na neplazmované polyesterové tkanině

Měření	Skelná tkanina úhel smáčení [°]	Uhlíková tkanina úhel smáčení [°]	Kevlarová tkanina úhel smáčení [°]	Polyesterová tkanina čas vsakování [s]
1	39,5	36,5	18,9	15,0
2	29,3	34,6	23,2	16,0
3	24,2	31,5	21,0	15,0
4	30,7	35,6	17,3	20,0
5	33,4	34,7	21,6	17,0
6	26,3	39,9	23,1	13,0
7	34,1	34,0	24,3	16,0
8	32,4	42,5	20,4	20,0
9	26,3	35,6	21,3	16,0
10	27,0	39,0	22,0	18,0
Průměrná hodnota	30,3	36,4	21,3	16
Směrodatná odchylka	4,404	3,039	1,976	2,107
Variační koeficient [%]	14,530	8,355	9,276	12,694

Tabulka 9: Přehled naměřených úhlů smáčení polyesterovou pryskyřicí na tkaninách plazmovaných 20 s a časů vsakování kapky polyesterové pryskyřice na polyesterové tkanině plazmované 20 s

Měření	Skelná tkanina úhel smáčení [°]	Uhlíková tkanina úhel smáčení [°]	Kevlarová tkanina úhel smáčení [°]	Polyesterová tkanina čas vsakování [s]
1	28,4	27,9	18,5	22,0
2	29,4	17,6	23,2	23,0
3	23,5	26,1	22,4	27,0
4	25,8	26,7	29,3	21,0
5	24,2	29,6	32,7	22,0
6	22,9	21,5	27,4	23,0
7	33,7	30,3	25,8	22,0
8	31,9	33,6	27,5	20,0
9	33,9	27,3	23,5	19,0
10	27,1	34,9	32,5	16,0
Průměrná hodnota	28,1	27,5	26,3	21
Směrodatná odchylka	3,878	4,933	4,298	2,729
Variační koeficient [%]	13,814	17,906	16,360	12,695

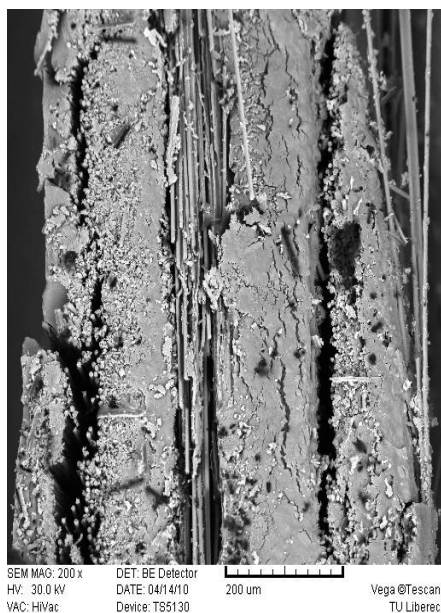
Tabulka 10: Přehled naměřených úhlů smáčení polyesterovou pryskyřicí na tkaninách plazmovaných 40 s

Měření	Skelná tkanina úhel smáčení [°]	Uhlíková tkanina úhel smáčení [°]	Kevlarová tkanina úhel smáčení [°]
1	24,7	26,2	22,2
2	25,0	25,4	32,2
3	25,1	27,9	25,8
4	22,9	27,5	23,2
5	33,1	25,3	27,7
6	26,2	28,3	31,1
7	22,7	21,6	26,6
8	26,1	23,0	27,2
9	28,0	27,5	23,1
10	21,3	26,8	33,8
Průměrná hodnota	25,5	25,9	27,3
Směrodatná odchylka	3,134	2,076	3,802
Variační koeficient [%]	12,286	8,005	13,932

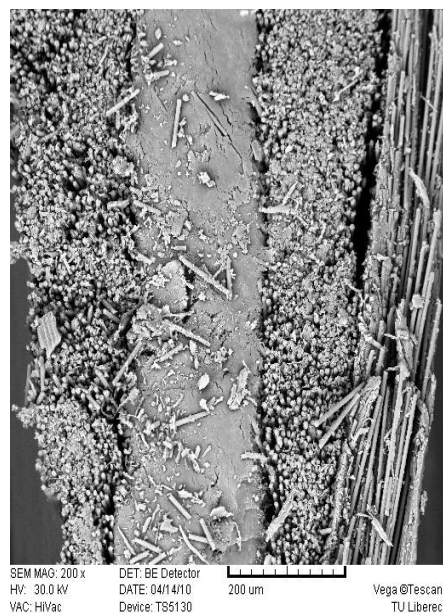
Tabulka 11: Přehled naměřených úhlů smáčení polyesterovou pryskyřicí na tkaninách plazmovaných 60 s

Měření	Skelná tkanina úhel smáčení [°]	Uhlíková tkanina úhel smáčení [°]	Kevlarová tkanina úhel smáčení [°]
1	22,7	23,8	34,9
2	20,2	29,5	35,2
3	24,6	32,1	31,5
4	19,7	22,0	26,6
5	24,2	19,0	32,8
6	31,5	19,1	20,6
7	34,6	24,1	19,9
8	26,1	16,8	27,9
9	20,6	15,4	26,4
10	19,3	33,5	29,4
Průměrná hodnota	24,3	23,5	28,5
Směrodatná odchylka	4,898	6,029	5,092
Variační koeficient [%]	20,118	25,648	17,861

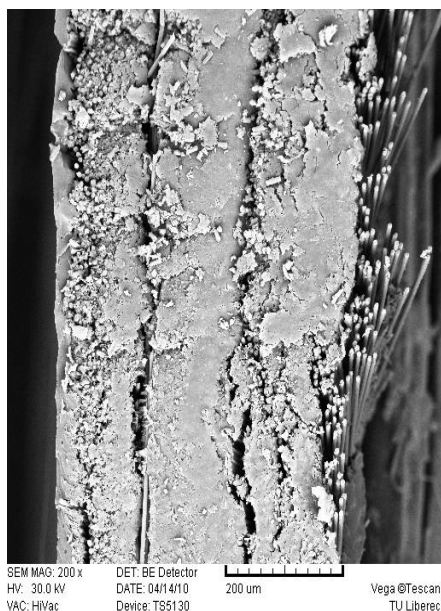
Příloha č. 3



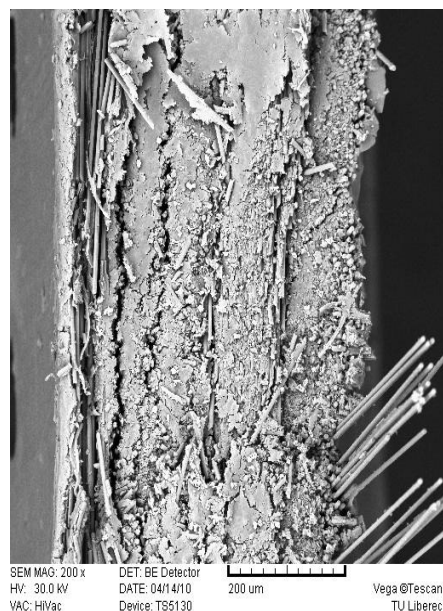
Obrázek 81: Příčný řez neupravené uhlíkové kompozitní struktury



Obrázek 82: Příčný řez uhlíkové kompozitní struktury upravené plazmatem 20 s



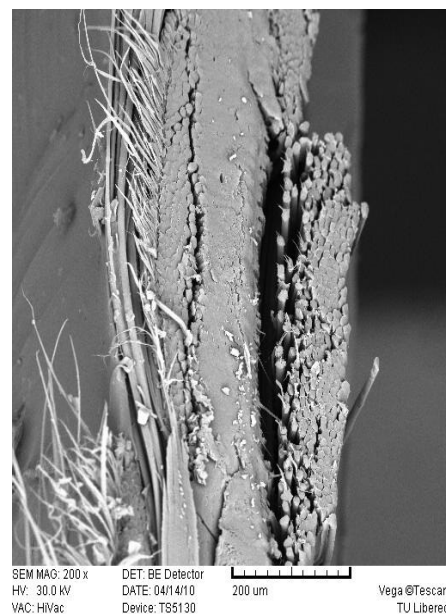
Obrázek 83: Příčný řez uhlíkové kompozitní struktury upravené plazmatem 40 s



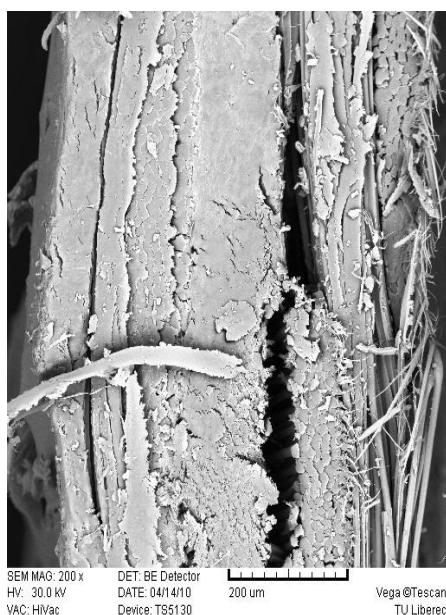
Obrázek 84: Příčný řez uhlíkové kompozitní struktury upravené plazmatem 60 s



Obrázek 85: Příčný řez neupravené kevlarové kompozitní struktury



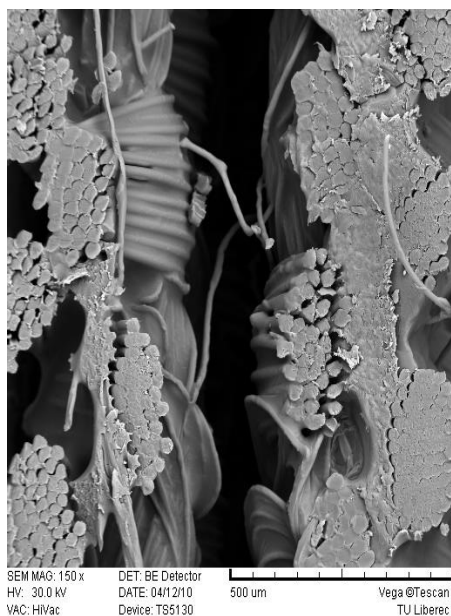
Obrázek 86: Příčný řez kevlarové kompozitní struktury upravené plazmatem 20 s



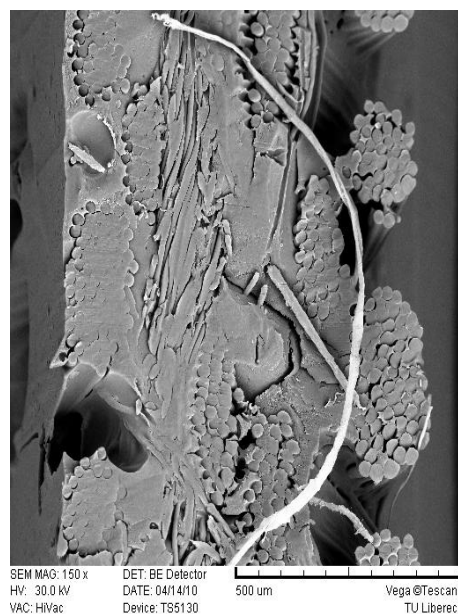
Obrázek 87: Příčný řez kevlarové kompozitní struktury upravené plazmatem 40 s



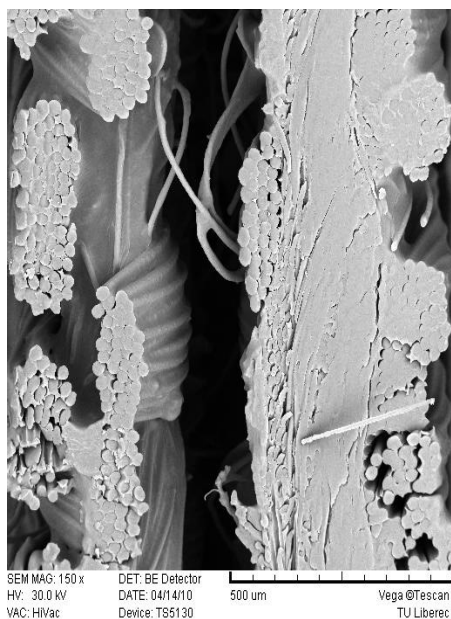
Obrázek 88: Příčný řez kevlarové kompozitní struktury upravené plazmatem 60 s



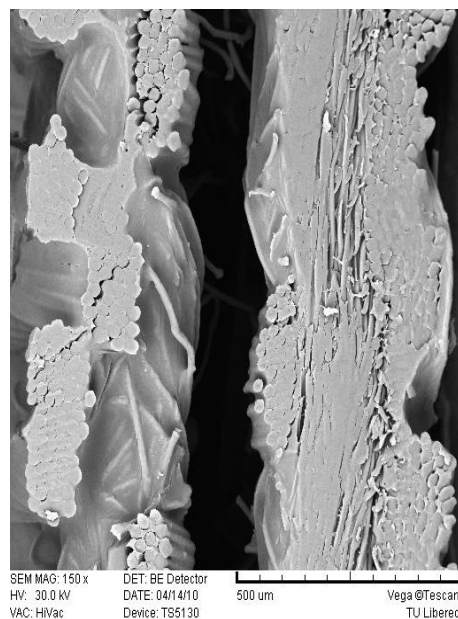
Obrázek 89: Příčný řez neupravené polyesterové kompozitní struktury



Obrázek 90: Příčný řez polyesterové kompozitní struktury upravené plazmatem 20 s



Obrázek 91: Příčný řez polyesterové kompozitní struktury upravené plazmatem 40 s



Obrázek 92: Příčný řez polyesterové kompozitní struktury upravené plazmatem 60 s

Příloha 4



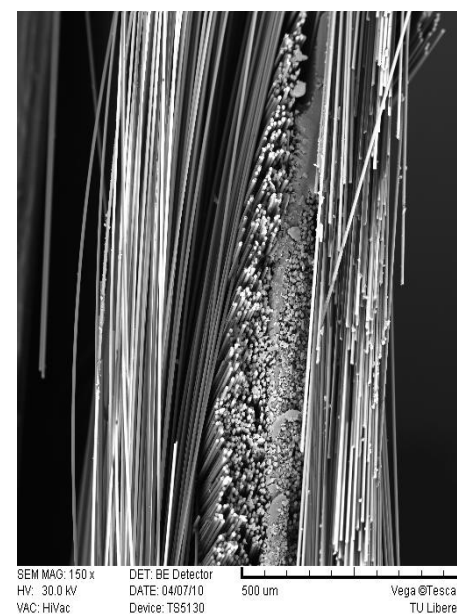
Obrázek 93: Příčný řez neupravené uhlíkové kompozitní struktury



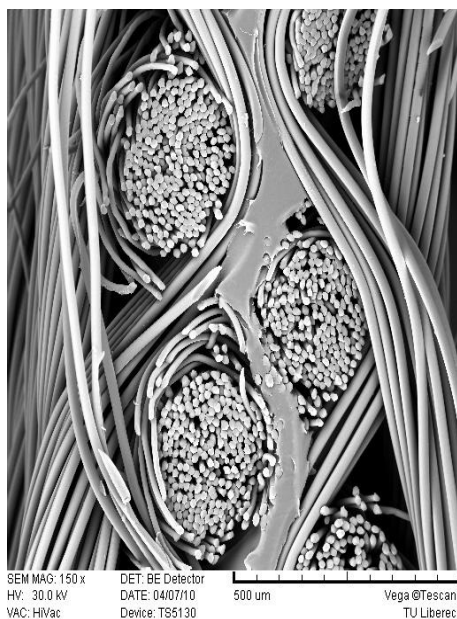
Obrázek 94: Příčný řez uhlíkové kompozitní struktury upravené plazmatem 20 s



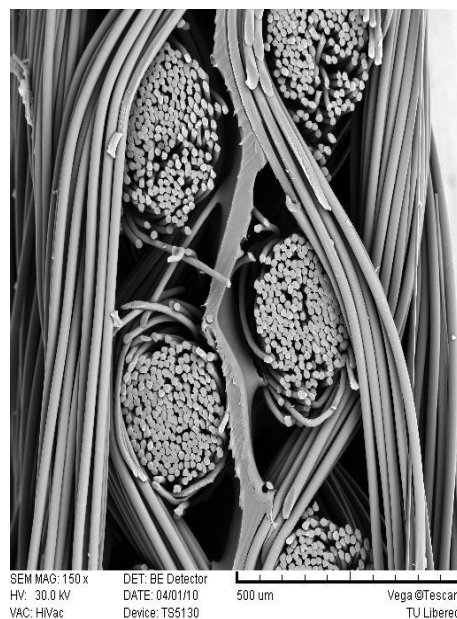
Obrázek 95: Příčný řez uhlíkové kompozitní struktury upravené plazmatem 40 s



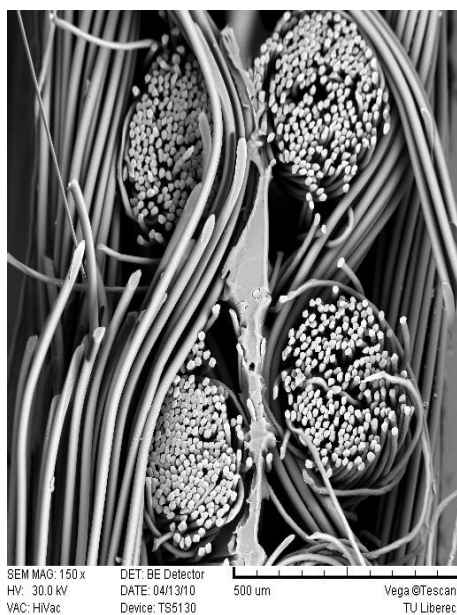
Obrázek 96: Příčný řez uhlíkové kompozitní struktury upravené plazmatem 60 s



Obrázek 97: Příčný řez neupravené polyesterové kompozitní struktury



Obrázek 98: Příčný řez polyesterové kompozitní struktury upravené plazmatem 20 s



Obrázek 99: Příčný řez polyesterové kompozitní struktury upravené plazmatem 40 s



Obrázek 100: Příčný řez polyesterové kompozitní struktury upravené plazmatem 60 s

Příloha č. 5

Tabulka 12: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 neplazmované skelné kompozitní struktury spojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	1,85189	32,26540	0,05239
2	3,38075	42,28576	0,06216
3	1,91664	34,49710	0,04189
4	2,02037	34,54426	0,0469
5	2,21670	36,82668	0,04089
Průměrná hodnota	2,27727	36,08384	0,04885
Směrodatná odchylka	0,63213	3,82375	0,00874
Variační koeficient [%]	27,75803	10,59683	17,88507

Tabulka 13: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 neplazmované uhlíkové kompozitní struktury spojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	4,30461	11,08368	0,13043
2	4,32662	34,65316	0,11490
3	3,15122	29,14658	0,08941
4	4,27676	15,62622	0,11184
5	4,06441	23,99908	0,10870
Průměrná hodnota	4,02472	22,90174	0,11106
Směrodatná odchylka	0,49939	9,62935	0,01470
Variační koeficient [%]	12,40821	42,04638	13,23952

Tabulka 14: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 neplazmované kevlarové kompozitní struktury spojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	7,25371	40,57722	0,13727
2	6,30688	42,60155	0,13224
3	6,23795	45,69692	0,10196
4	5,77714	46,12992	0,09864
5	6,09765	45,78642	0,10123
Průměrná hodnota	6,33467	44,15841	0,11427
Směrodatná odchylka	0,55267	2,45729	0,01883
Variační koeficient [%]	8,72454	5,56472	16,47573

Tabulka 15: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 neplazmované PES kompozitní struktury spojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	3,73094	39,18386	0,06775
2	5,89125	39,60692	0,13749
3	3,89176	43,62850	0,07533
4	5,63365	44,90918	0,11016
5	2,83910	39,40340	0,09232
Průměrná hodnota	4,39734	41,34637	0,09661
Směrodatná odchylka	1,31225	2,71012	0,02810
Variační koeficient [%]	29,84199	6,55467	29,08822

Tabulka 16: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 skelné kompozitní struktury plazmované 20 s a spojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	4,86574	36,36438	0,11260
2	3,78524	43,62036	0,09758
3	4,42714	37,02156	0,09890
4	4,06782	39,70586	0,09044
5	3,72397	40,84174	0,09933
Průměrná hodnota	4,17398	39,51078	0,09977
Směrodatná odchylka	0,47632	2,94933	0,00802
Variační koeficient [%]	11,41163	7,46462	8,04041

Tabulka 17: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 uhlíkové kompozitní struktury plazmované 20 s a spojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	4,68040	16,33206	0,12558
2	3,40094	15,34166	0,09080
3	5,62251	18,11316	0,14765
4	4,85391	16,72732	0,12609
5	5,40878	32,81662	0,11396
Průměrná hodnota	4,79331	19,86616	0,12082
Směrodatná odchylka	0,86912	7,30754	0,02073
Variační koeficient [%]	18,13198	36,78387	17,15776

Tabulka 18: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 kevlarové kompozitní struktury plazmované 20 s a pojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	5,30574	45,8925	0,10277
2	3,53530	41,44538	0,06585
3	3,47334	39,46516	0,07845
4	5,25422	38,85120	0,10941
5	4,89568	44,30266	0,10456
Průměrná hodnota	4,49286	41,99138	0,09221
Směrodatná odchylka	0,91639	3,04555	0,019
Variační koeficient [%]	20,3965	7,25279	20,60528

Tabulka 19: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 PES kompozitní struktury plazmované 20 s a pojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	2,36290	47,60932	0,05281
2	4,83998	48,81836	0,09172
3	3,29929	39,84110	0,08607
4	6,24213	42,60522	0,1178
5	5,39973	43,84236	0,12496
Průměrná hodnota	4,42881	44,54327	0,09467
Směrodatná odchylka	1,57668	3,67542	0,02867
Variační koeficient [%]	35,60052	8,25135	30,28414

Tabulka 20: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 skelné kompozitní struktury plazmované 40 s a pojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	5,37258	43,24974	0,11544
2	5,78264	35,19206	0,14596
3	4,46055	37,27122	0,1326
4	4,39372	40,96020	0,10121
5	6,63244	39,65702	0,11647
Průměrná hodnota	5,32839	39,26604	0,12233
Směrodatná odchylka	0,94016	3,14124	0,01726
Variační koeficient [%]	17,64435	7,99988	14,10748

Tabulka 21: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 uhlíkové kompozitní struktury plazmované 40 s a pojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	4,03169	23,99362	0,10925
2	5,57448	32,99348	0,11810
3	4,47308	27,92134	0,14102
4	7,84339	38,86944	0,15532
5	6,76010	31,63680	0,21202
Průměrná hodnota	5,73655	31,08294	0,14714
Směrodatná odchylka	1,58237	5,58661	0,04060
Variační koeficient [%]	27,584	17,97324	27,59277

Tabulka 22: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 kevlarové kompozitní struktury plazmované 40 s a pojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	3,68290	43,24621	0,09481
2	3,31182	42,47035	0,06644
3	3,61537	44,87592	0,07086
4	2,46455	42,27916	0,05977
5	4,54340	44,31502	0,08778
Průměrná hodnota	3,52361	43,43733	0,07593
Směrodatná odchylka	0,74837	1,13499	0,01478
Variační koeficient [%]	21,23875	2,61294	19,46727

Tabulka 23: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 PES kompozitní struktury plazmované 40 s a pojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	3,84442	45,37978	0,08063
2	2,46664	44,86296	0,04425
3	3,18511	41,47294	0,05630
4	2,69221	45,14894	0,06356
5	2,06771	42,38622	0,03657
Průměrná hodnota	2,85122	43,85017	0,05626
Směrodatná odchylka	0,68648	1,79211	0,01717
Variační koeficient [%]	24,07671	4,08689	30,51902

Tabulka 24: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 skelné kompozitní struktury plazmované 60 s a pojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	5,16745	35,90189	0,10501
2	5,29878	37,66386	0,11897
3	4,75366	40,00740	0,09523
4	5,22245	40,27532	0,10562
5	6,49686	44,33028	0,12968
Průměrná hodnota	5,38784	39,63575	0,11090
Směrodatná odchylka	0,65497	3,17867	0,01347
Variační koeficient [%]	12,15645	8,01970	12,14608

Tabulka 25: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 uhlíkové kompozitní struktury plazmované 60 s a pojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	6,72251	28,86260	0,17236
2	8,71921	36,47172	0,16657
3	5,35657	36,03716	0,16166
4	5,14631	32,12938	0,11715
5	6,32289	24,71496	0,17599
Průměrná hodnota	6,45350	31,64316	0,15875
Směrodatná odchylka	1,42608	4,96463	0,02389
Variační koeficient [%]	22,09786	15,68941	15,04973

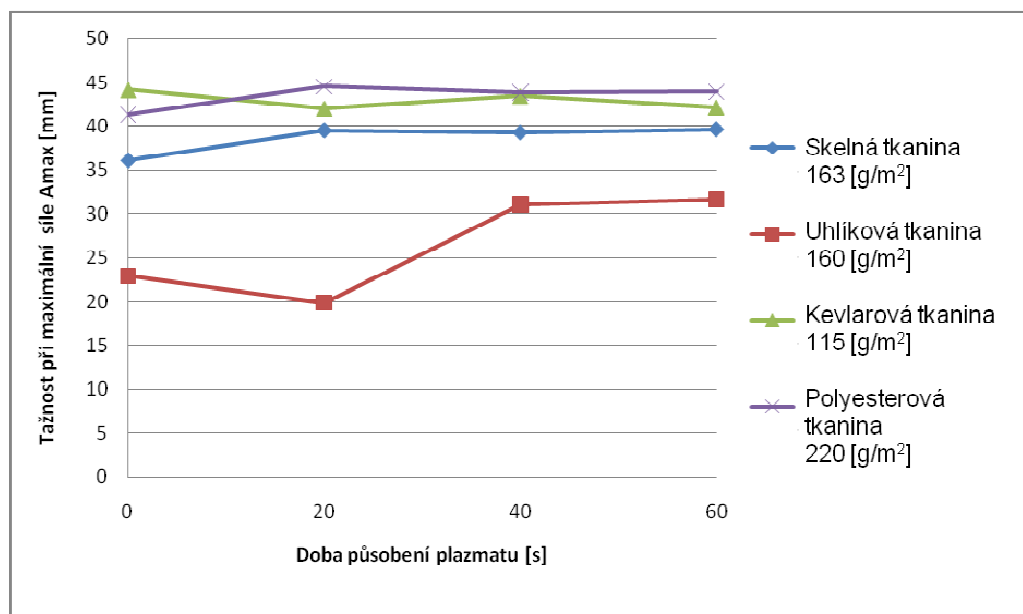
Tabulka 26: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 kevlarové kompozitní struktury plazmované 60 s a pojené PE-LD

Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	7,55307	41,50652	0,14684
2	4,61537	42,74954	0,08418
3	6,32011	38,93954	0,15865
4	4,88524	42,73198	0,09687
5	4,17999	44,71719	0,10417
Průměrná hodnota	5,51076	42,12895	0,11814
Směrodatná odchylka	1,39553	2,12176	0,03266
Variační koeficient [%]	25,32373	5,03635	27,64182

Tabulka 27: Přehled naměřených parametrů přístroje LabTest 2.010 PES kompozitní struktury plazmované 60 s a pojené PE-LD

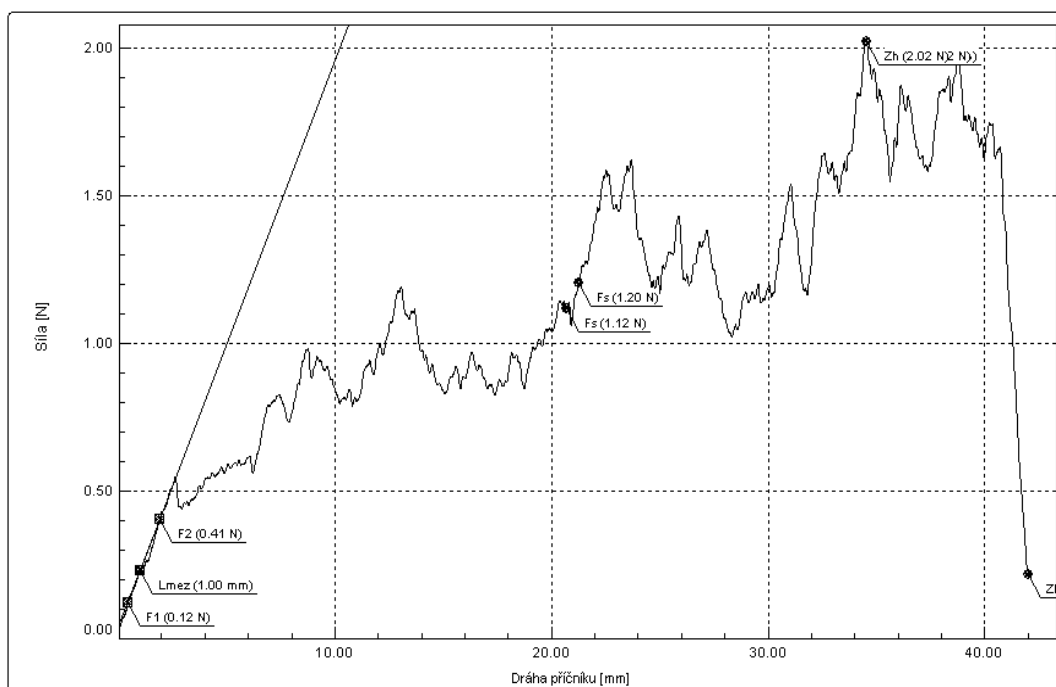
Zkouška	Fmax [N]	Amax [mm]	W [J]
1	2,58499	45,51984	0,05627
2	5,31618	45,93714	0,09019
3	3,15657	46,34230	0,04999
4	3,46638	39,05174	0,05934
5	4,49397	42,73216	0,07394
Průměrná hodnota	3,80362	43,91664	0,06595
Směrodatná odchylka	1,06622	3,06622	0,01615
Variační koeficient [%]	28,74572	6,9819	24,49173

Příloha č. 6

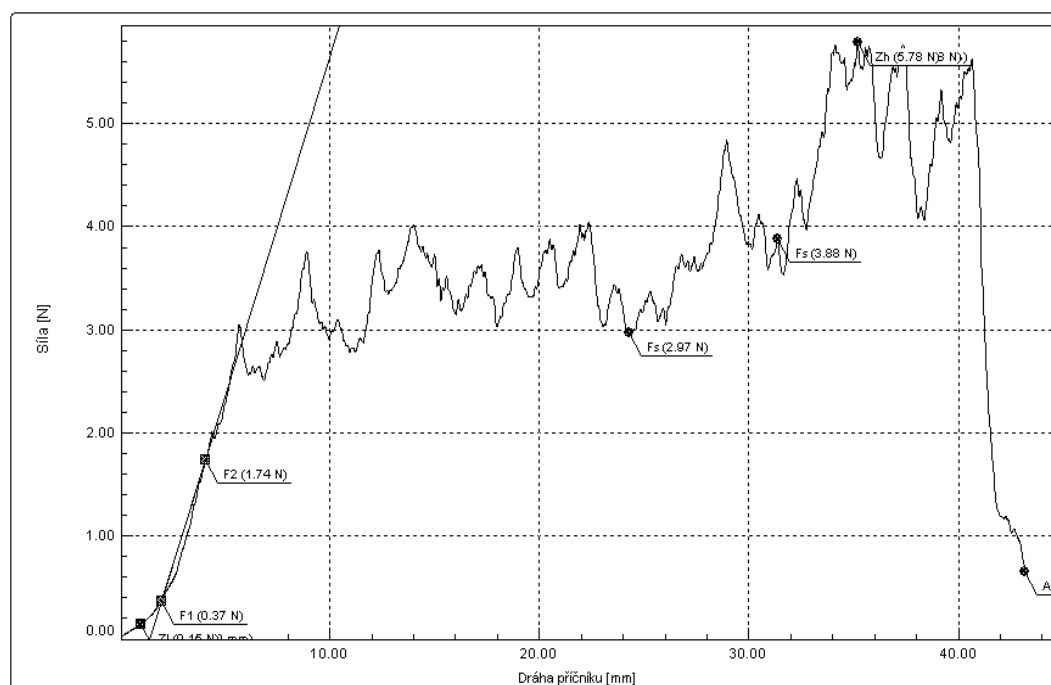


Graf 5: Závislost tažnosti při maximální dosažené síle na době působení plazmatu u skelných, uhlíkových, kevlarových a polyesterových kompozitních struktur pojených polyetylenovou fólií

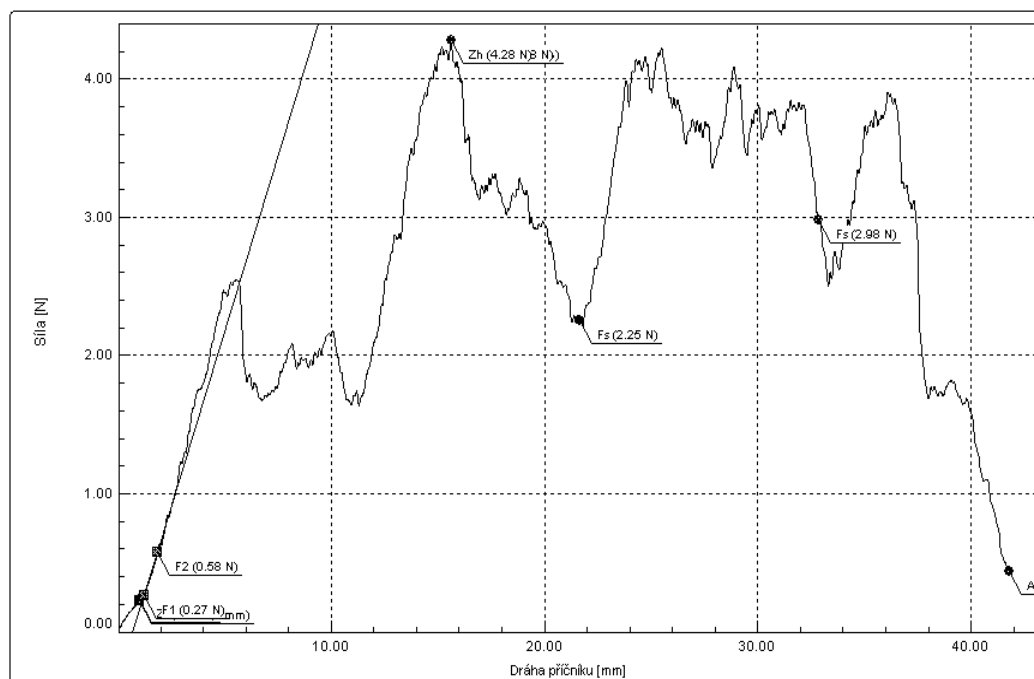
Příloha č. 7



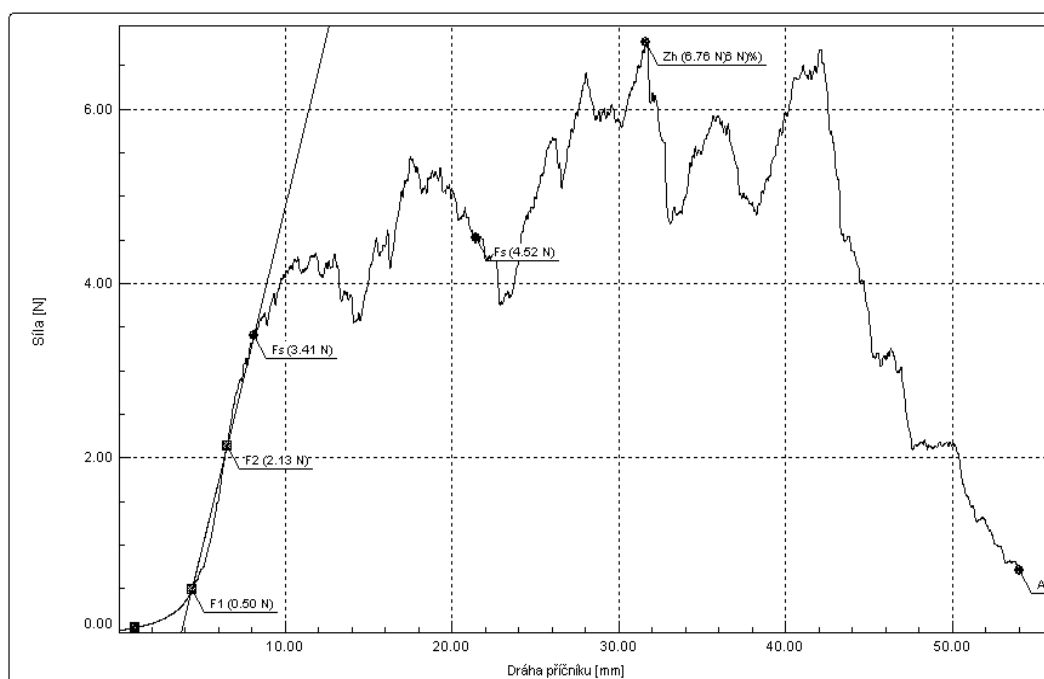
Graf 10: Závislost síly na prodloužení (dráze příčniku) u neplazmované skelné kompozitní struktury



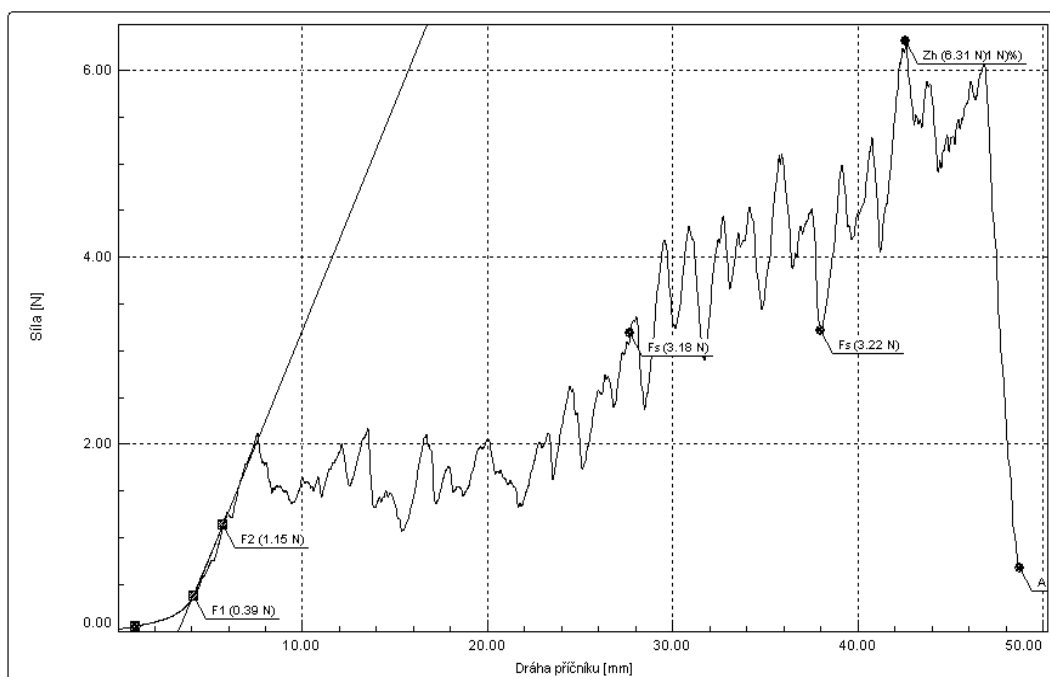
Graf 11: Závislost síly na prodloužení (dráze příčniku) u skelné kompozitní struktury plazmované 40s



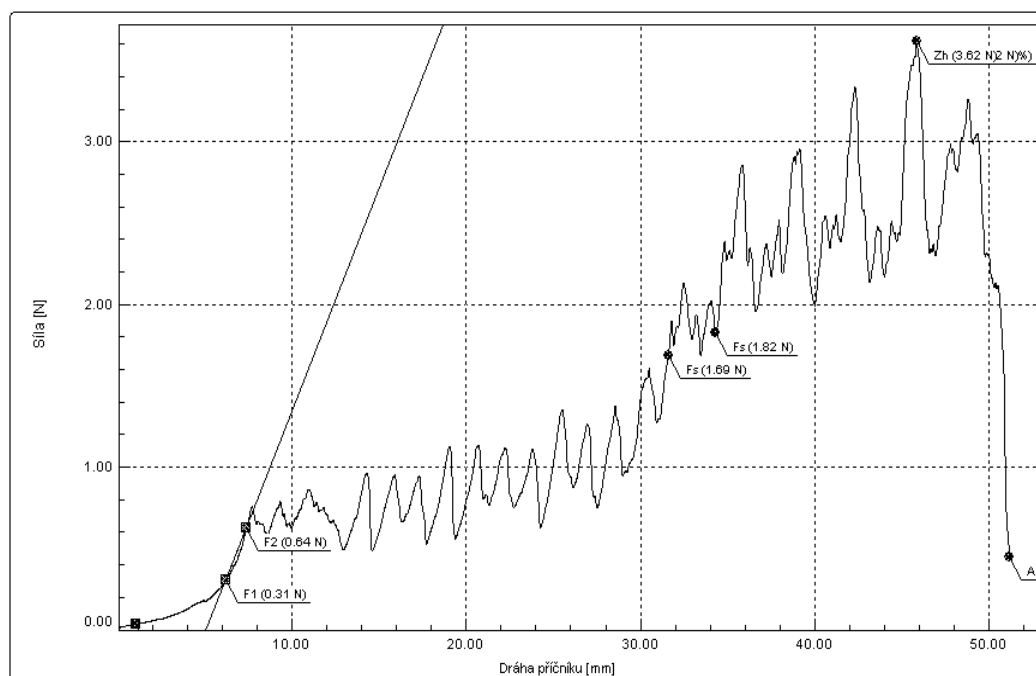
Graf 12: Závislost síly na prodloužení (dráze příčnicku) u neplazmované uhlíkové kompozitní struktury



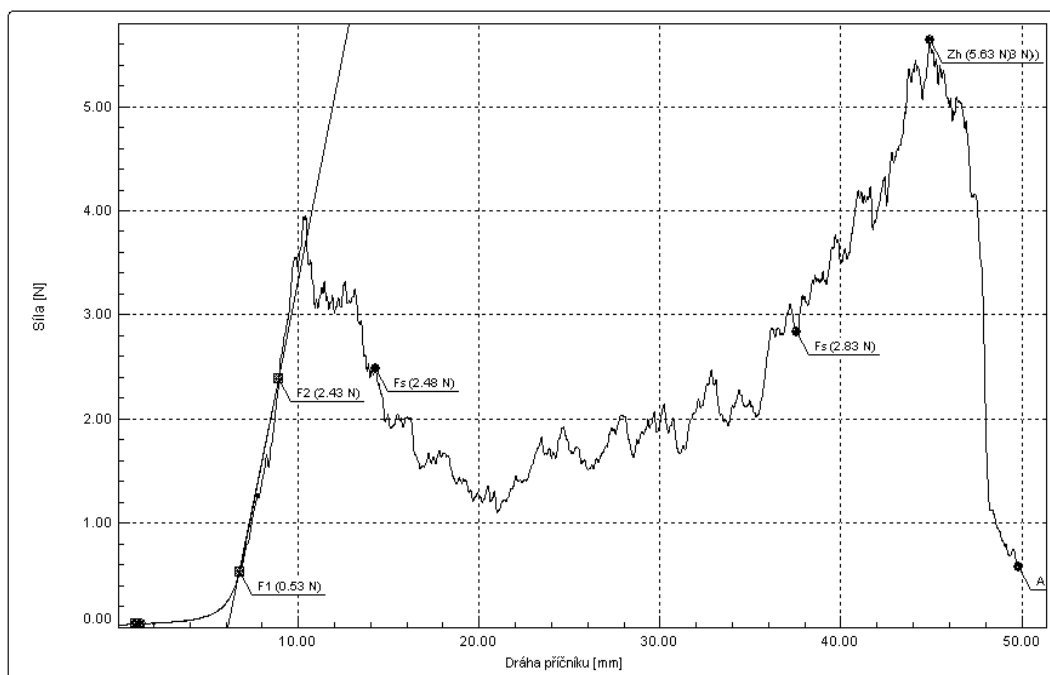
Graf 13: Závislost síly na prodloužení (dráze příčnicku) u uhlíkové kompozitní struktury plazmované 40s



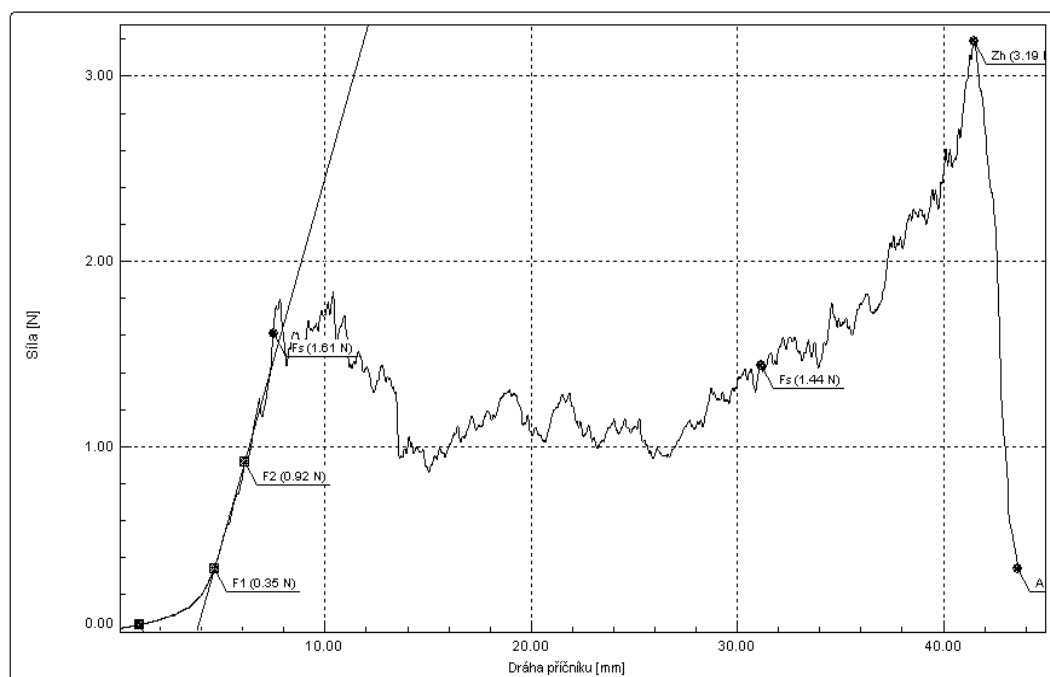
Graf 14: Závislost síly na prodloužení (dráze příčnicku) u neplazmované kevlarové kompozitní struktury



Graf 15: Závislost síly na prodloužení (dráze příčnicku) u kevlarové kompozitní struktury plazmované 40s



Graf 16: Závislost síly na prodloužení (dráze příčniku) u neplazmované polyesterové kompozitní struktury



Graf 17: Závislost síly na prodloužení (dráze příčniku) u polyesterové kompozitní struktury plazmované 40s